

交直流混联系统连锁故障搜索模型及故障关联分析

李文博, 朱元振, 刘玉田

(电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省济南市 250061)

摘要: 随着大规模直流输电系统的相继投运, 交直流耦合问题突出, 连锁故障的风险加剧。首先, 针对交直流混联系统建立了一种用于故障快速筛选的事故链搜索模型。该模型包括交流侧故障搜索模型和直流故障判断环节两部分: 前者计及了支路对直流运行的影响度和结构重要度, 并形成停运概率初筛后风险优先的搜索策略; 后者将交流系统中短路故障开断和无故障跳闸开断区分开, 分别考虑与直流系统的关联情况。其次, 提出了一种考虑项序和事务权重的 Apriori 算法进行故障关联分析, 筛选出威胁系统安全的强关联规则。仿真结果表明, 所提方法能高效搜索出直流退出运行的故障演化路径, 并有效识别危及系统安全的强关联规则。

关键词: 交直流混联系统; 连锁故障; 事故链; 故障关联分析

0 引言

近年来, 世界范围内发生了多起连锁故障导致的大停电事故, 激发了对连锁故障传播机理的研究^[1-2]。目前, 针对连锁故障的研究多集中在纯交流系统, 且主要分为两类: 第 1 类基于复杂系统理论^[3-4]和复杂网络理论^[5-7], 从宏观角度探究连锁故障的演化机理和影响因素, 无法反映系统所面临的具体风险; 第 2 类基于电力系统分析理论, 以模式搜索技术研究贴近实际的连锁故障演化过程。例如: 文献[8]提出一种计及关键线路影响的连锁故障事故链搜索策略, 探究了关键线路对连锁故障发展的影响程度; 文献[9]基于渗流理论构建了支路停运概率指标, 并以此为依据进行后续故障搜索; 文献[10]建立了一种基于多时间尺度的连锁故障演化模型, 采用 3 层计算结构处理 3 种时间尺度的关系, 进而得到连锁故障演化路径。

随着中国大规模直流输电系统的相继投运, 交直流耦合问题突出。若交流侧发生连锁故障, 易蔓延至直流系统导致其闭锁退出运行, 引发更大规模的潮流转移和功率不平衡, 加剧大停电事故的风险。在电力系统运行中, 调度部门需对系统所面临的连锁故障风险做出及时预警, 连锁故障是一类特殊的 $N-k$ 故障, 若对每个可能发生的故障组合逐一计

算, 将无法满足在线运行的要求。因此, 有必要针对交直流混联系统进行潜在故障演化路径的快速搜索、筛选与分析, 筛得高风险故障路径和强关联故障环节进行后续的精确定评和预警。

在交直流连锁故障方面, 文献[11]利用 PSS/E 仿真软件建立了一种交直流连锁故障动态仿真模型, 考虑了保护及控制响应的概率动作特性, 但采用动态仿真及蒙特卡洛随机算法, 耗时长, 难以实现高风险演化路径的快速搜索; 文献[12]提出一种多直流馈入系统大停电故障集的构建方法, 引入动态潮流算法, 但故障搜索过程中缺少对故障概率的考量; 文献[13]建立了一种基于改进 OPA 模型的交直流系统连锁故障模型, 较全面地考虑了直流保护类型, 但交流侧采用 OPA 模型难以体现支路对直流运行的影响度差异, 且未考虑支路连续跳闸开断后难以支撑直流正常运行的情形。在故障关联性分析方面, 文献[5]基于 $N-1$ 校验构建了故障相关性网络, 难以反映系统连锁故障的传播特点; 文献[14]构建了一种基于事故链信息的故障关联矩阵, 但局限于两故障间的分析, 不能计算故障组合间的关联性; 文献[15]提出利用 Apriori 算法进行故障关联分析, 但忽略了故障顺序及事故链风险差异, 易夸大支持度并造成无效规则的误筛。

本文针对交直流混联系统, 建立了一种用于故障快速筛选的事故链搜索模型: 交流侧故障搜索过程中计及支路对直流运行的影响度和结构重要度, 并将短路开断和无故障跳闸开断区分开, 分别考虑与直流系统的关联, 形成完整的事故链搜索流程。

收稿日期: 2018-02-10; 修回日期: 2018-06-12。

上网日期: 2018-06-27。

国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700840)。

针对事故链集合,提出一种考虑项序和事务权重的 Apriori 算法进行故障关联分析,识别威胁系统安全的强关联故障组合。算例系统仿真验证了所提方法的有效性。

1 交直流混联系统连锁故障事故链搜索模型

事故链搜索模型由交流侧故障搜索模型和直流故障判断环节两部分构成,形成完整的事故链搜索流程,进而筛选高风险故障演化路径。

1.1 交流侧故障搜索模型

传统的交流连锁故障搜索过程多采用停运概率优先的搜索策略,易造成某些小概率、高风险的事故链遗漏。针对这种情况,在混联系统交流侧故障搜索过程中计及了支路重要性的影响,形成停运概率初筛后风险优先的搜索策略。

1.1.1 交流线路停运概率

不考虑外部因素的影响,交流侧连锁故障蔓延的主要原因是潮流转移和保护隐性故障,考虑两方面因素构建线路停运概率模型。假设事故链中第 j 级为待预测级,待预测线路为 k 。

潮流转移导致部分交流线路负载增大,随着潮流增加,线路发热量增加,线路重载下垂触树或过热熔断的概率增大,并且随着潮流越过稳定极限,过负荷保护动作时限越来越小,线路过载跳闸的概率增大。考虑到函数连续可导性,利用双曲正切函数描述潮流转移停运概率与潮流之间的关系^[16],如图 1 所示,对应关系式为:

$$P_{k,f} = \frac{1}{2}(1 + \tanh(aL_k + b)) \quad (1)$$

式中: $P_{k,f}$ 为由潮流转移导致的线路 k 的停运概率; L_k 为线路 k 的视在功率大小; a 和 b 为待拟合参数,可由 $[L_{\max}^n, P_0]$ 和 $[L_{\max}, \bar{P}]$ 两点代入式中求得,其中 L_{\max}^n 和 L_{\max} 分别为潮流正常值的上限和潮流限值, P_0 为停运概率长期统计平均值, \bar{P} 为概率上限值,接近于 1。

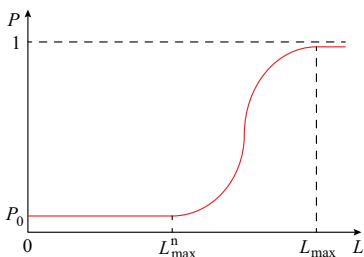


图 1 线路停运概率随潮流变化曲线
Fig.1 Curve of failure probability of line varying with its power flow

隐性故障是继电保护装置的固有缺陷,在系统发生故障时才表现出来。利用隐性故障停运概率 $P_{k,h}$ 表示第 $j-1$ 级故障线路 l 开断后线路 k 发生保护隐性故障的可能性。仅考虑与上级故障线路相连的线路存在误动可能,且负载率越大时隐性误动概率越高^[9]。

$$P_{k,h} = \begin{cases} p(1 - e^{-\varepsilon\eta_k}) & k \cap l \neq 0 \\ 0 & k \cap l = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为保护隐性故障最大概率; ε 为调节系数; η_k 为线路 k 的负载率大小; $k \cap l \neq 0$ 表示线路 k 和 l 连接于同一条母线; $k \cap l = 0$ 表示线路 k 和 l 不相连。

综合潮流转移和保护隐性故障两方面因素,线路 k 的故障停运概率 P_k 为:

$$P_k = P_{k,f} + P_{k,h} \quad (3)$$

1.1.2 对直流运行影响度和结构重要度

某些关键线路的开断是造成系统连锁故障蔓延的内在原因^[8]。在交流侧故障搜索过程中需计及关键线路对故障演化的影响,本文从对直流的影响和拓扑结构两方面动态更新支路在系统中的重要性。

1) 交流线路对直流运行的影响度

某些交流线路故障开断可能会直接触发直流连锁故障,也可能会严重削弱对直流系统的支撑能力,加快直流退出运行的进程,引发大停电事故。

短路比反映了交流系统的网架强度及对直流系统的支撑能力,是衡量交直流系统电压稳定性的重要指标;交流线路与换流母线之间的电气距离越近,与直流系统的耦合作用越强。因此,综合考虑线路退出运行造成的短路比变化量(若为多馈入受端系统则取多馈入短路比,后文相同),以及线路和换流站之间的电气距离,构成对直流运行的影响度指标 I_k 如下:

$$I_k = \sum_{i=1}^n \omega_i |K_{SCR,i}^{j-1} - K_{SCR,i}^j| \frac{X_{cc,i}}{X_{mm} + X_{cc,i} - 2X_{mc,i}} \quad (4)$$

式中: n 为直流系统数量; $K_{SCR,i}^{j-1}$ 和 $K_{SCR,i}^j$ 分别为 k 开断前后直流 i 换流母线的短路比; X_{mm} 为线路 k 一端母线 m 的节点自阻抗; $X_{mc,i}$ 为母线 m 与直流 i 逆变侧换流母线 c 之间的节点互阻抗; $X_{mm} + X_{cc,i} - 2X_{mc,i}$ 表示母线 m 和换流母线 c 之间的电气距离,并将换流母线自阻抗 $X_{cc,i}$ 作为基值将其标么化; ω_i 为权重系数。

为避免搜索时反复更新系统拓扑结构耗费时间,将换流母线电压用额定电压代替,采用追加支路法模拟线路开断,可实现短路比变化量的粗略快速计算^[17]。

2) 交流线路的结构重要度

研究表明^[7],少数长程连接线路的开断对连锁故障的扩散起到了推波助澜的作用,而高电气介数线路往往属于系统的长程连接,具有关键性地位。电气介数从拓扑结构角度量化了线路对系统潮流传播的贡献程度,因此利用该指标表征线路的结构重要度,并使用功率传输分布因子进行线性化快速计算^[18]。此外,计算电气介数指标时将直流系统等效为逆变侧母线的有功发电和整流侧母线的有功负荷,即

$$B_k = \sum_{x \in G, y \in L} \sqrt{P_{Gx} P_{Ly}} \frac{P_{xy}(k)}{P_{xy}} \quad (5)$$

式中: B_k 为线路 k 的电气介数指标; P_{Gx} 和 P_{Ly} 分别为发电机 x 的有功发电和负荷 y 的有功负荷; G 和 L 分别表示发电机和负荷集合; P_{xy} 为由发电机 x 向负荷 y 传输的有功功率; $P_{xy}(k)$ 为 P_{xy} 流经 k 的部分。

1.1.3 交流侧故障搜索策略

将支路对直流影响度和结构重要度综合视作停运后果,协同停运概率构建停运风险指标如下:

$$R_k = \begin{cases} P_k \frac{I_k B_k}{\sum_{i \in T} I_i B_i} & P_k \geq P_{th} \\ 0 & P_k < P_{th} \end{cases} \quad (6)$$

式中: R_k 为线路 k 的停运风险指标; P_{th} 为概率初筛阈值; T 为经概率初筛后的备选线路集合。

在交流侧连锁故障搜索过程中计及线路重要性的影响,形成停运概率初筛后风险优先的搜索策略。后续故障具体搜索策略如下:①设置故障概率初筛阈值 P_{th} ,根据上一级故障后的潮流结果计算剩余线路的停运概率 P ,初筛 $P > P_{th}$ 的线路构成备选线路集合 T ;②计算当前拓扑结构下备选线路集 T 中线路对直流运行影响度和结构重要度,并利用式(6)计算线路的停运风险指标;③将各线路停运风险指标进行模糊聚类,选择风险指标最高一类的线路分别作为下一级故障线路。

停运概率初筛,可缩小线路搜索范围并减少停运风险值计算量,同时保证搜索过程中故障演化的客观性;停运风险优先使搜索向故障风险较大的方向引导。概率初筛后风险优先的搜索策略兼顾了故障客观演化和启发引导,可减少部分高风险事故链的遗漏。

1.2 直流故障判断环节

交流侧发生大规模连锁故障,极易蔓延至直流系统,加剧大停电事故风险。本文考虑的直流故障类型为直流闭锁退出运行,且交流扰动导致直流故

障的触发条件取决于直流保护设置。

直流系统一般设有换相失败保护、100 Hz 谐波过流保护和换流变压器中性点零序过流保护等,保护参数由电气量阈值和时间阈值两维构成,当电气量与时间均越限后,直流闭锁退出运行。其中,换相失败是交直流耦合过程中最常见的一类故障响应,其根本原因是熄弧角 γ 小于极限熄弧角 γ_{min} (约 7°),利用熄弧角阈值与直流稳态参数导出换相失败电压阈值^[19],即

$$U_{th}^* = \frac{I_d^* X_k}{\cos \gamma_{min} - \cos \beta} \quad (7)$$

式中: U_{th}^* 为导致换相失败的换流电压阈值标么值; I_d^* 为直流运行电流标么值; X_k 为换流变压器短路电抗百分比; β 为超前触发角。换相失败保护时间阈值参考文献^[13]。

交流扰动引发直流故障大体可归纳为以下两种形式。

1)交流短路过程触发直流保护启动。一般地,当系统电压支撑能力较强且短路故障及时清除时,不会对直流运行造成严重影响;若系统支撑能力较弱,则直流存在闭锁风险。

2)直流近区交流线路连续开断后系统强度大幅下降且潮流重载,换流母线电压跌落导致直流持续换相失败,进而闭锁退出运行。

交流侧故障演化过程中主要有短路故障开断和无故障跳闸开断两类故障^[20],两类故障对直流系统影响不同:短路故障开断存在短路冲击过程,短路电气量可能触发直流保护动作;无故障跳闸开断无短路过程,忽略开断暂态过程,仅需考虑线路开断后换流母线稳态电压下降是否引发直流持续换相失败。故将两类故障区分开,分别考虑与直流系统的关联情况。对交流线路而言,根据负载水平的不同,其故障时间尺度不同:当架空线处于重载或一般过载状态时,故障时间尺度较长,长时间过热易导致其下垂触树短路;随着负载越限程度加深,过负荷或过流保护动作时限较短,此时故障类型倾向于过载跳闸开断。因此,本文通过负载率大小粗略划分故障类型,设定负载率阈值 η_{th} ,若待开断线路负载率 $\eta < \eta_{th}$,认为故障类型为短路开断;若 $\eta \geq \eta_{th}$,为无故障跳闸开断。

为实现故障路径的快速搜索,在考虑交直流关联情况时未完全采用时域仿真,而是将近似计算与少量仿真结合,从而对交直流耦合过程简化判断。

1) 短路故障开断与直流系统关联情况

交流短路故障可导致换相失败等故障响应,若系统电压支撑能力较强,短路及时清除后换流母线

电压和直流功率可迅速恢复,不会导致直流闭锁;若交流系统经连续开断后支撑能力较弱,由于直流在换相失败恢复过程中需吸收交流系统大量无功功率,短路故障清除后电压可能恢复缓慢或二次跌落,直流存在闭锁风险。因此,以直流短路比 $K_{SCR,i}$ 作为系统对直流 i 电压支撑能力的量化指标,并设置仿真门槛值 $K_{SCR,th}$ 作为是否利用准稳态模型进行仿真判断的判据之一,该门槛值参考交直流系统强弱划分标准选定^[21]。

利用节点阻抗矩阵进行短路计算实现预判断,以三相短路接地时换相失败判断过程为例,可通过计算逆变侧换流母线的短路电压与电压阈值进行比较,即

$$U_{cf,i} = U_{c0} - \left| \frac{Z_{cf}}{Z_{ff}} \right| U_{f0} \quad (8)$$

式中: $U_{cf,i}$ 为 f 点发生三相短路接地故障时直流 i 逆变侧换流母线 c 的短路电压; U_{c0} 和 U_{f0} 分别为换流母线和故障点短路前电压; Z_{ff} 为故障点 f 处的自阻抗; Z_{cf} 为节点 c 与 f 间的互阻抗。

在搜索过程中,当 $K_{SCR,i} > K_{SCR,th}$ 时,认为系统电压支撑能力较强,忽略短路过程对直流 i 的影响;当 $K_{SCR,i} \leq K_{SCR,th}$ 且 $U_{cf,i} < U_{th}$ 时,利用准稳态模型进行短时仿真,判断该短路过程是否造成直流 i 闭锁退出运行。

2) 无故障跳闸开断与直流系统关联情况

当交流线路无故障跳闸开断时,仅考虑开断后换流母线稳态电压是否低于换相失败阈值。若换流母线稳态电压小于 U_{th}^* ,认为直流发生持续换相失败进而退出运行,将相应直流闭锁加入下一级故障。

若交流线路开断后潮流不收敛无法得到换流母线稳态电压,则采用短路比判据进行辅助判断^[21]。利用追加支路法近似求得开断后短路比,若短路比小于临界短路比,表明交流系统强度难以支撑直流稳定运行,将直流闭锁故障追加至事故链中。

1.3 交直流混联系统连锁故障事故链搜索流程

基于所提搜索模型和策略,得到完整的交直流混联系统连锁故障事故链搜索流程,如图 2 所示。

事故链具体搜索流程如下。

步骤 1: 设置初始故障。

步骤 2: 直流故障判断。根据交流故障类型,按照 1.2 节中的交直流关联模型判断直流保护动作情况,若存在直流保护动作,相应直流闭锁加入下一级故障。

步骤 3: 交流故障搜索。按照 1.1 节所提方法搜索后续交流故障,若存在,将其加入下一级故障。

步骤 4: 判断是否已存在下一级故障。若是,设

置下一级故障,转入步骤 2,否则转入步骤 5。

步骤 5: 事故链结束,统计负荷损失。为保证事故链的快速搜索和筛选,搜索过程中未对各级故障进行暂态稳定性校验。若过程中潮流不收敛,则采取切机切负荷措施,其策略参考文献[8]。

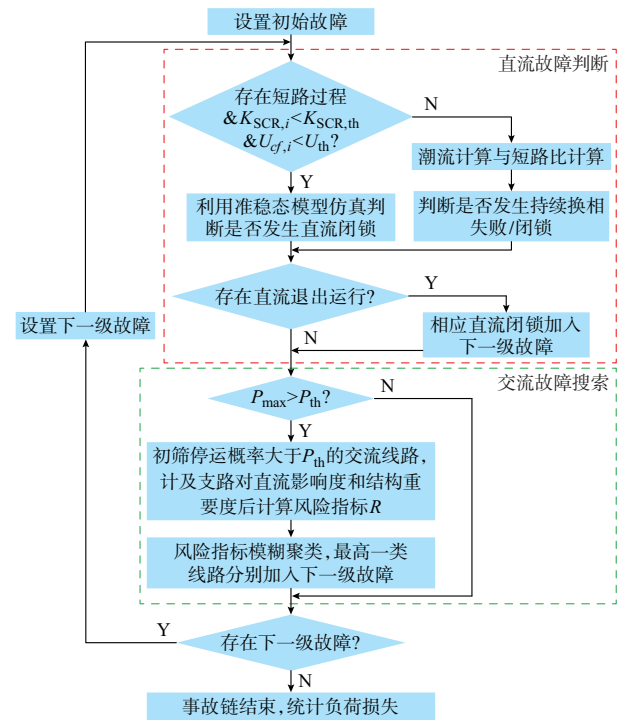


图 2 交直流混联系统连锁故障事故链搜索流程
Fig.2 Flow chart of search strategy of event chain for cascading failures in AC/DC hybrid system

在故障演化过程中,交流故障以邻近原则为主在局部传播。若故障由交流侧蔓延至直流系统,由于送受端强耦合,扰动经直流跨区域传播,故障影响由局部转为全局性。直流闭锁故障给系统带来严重危害,具体影响与系统联网结构有关:①若混联系统为异步互联,直流闭锁后送受端均出现功率不平衡,受端电网频率下降,送端电网频率上升且存在暂态失稳风险;②若混联系统为同步并联,直流闭锁后大规模功率转移至交流通道上,若交流通道薄弱,功率冲击易造成系统暂态失稳。

在故障搜索过程中,直流闭锁易引发暂态稳定或功率平衡问题,为保持交流系统稳定,直流闭锁后根据安全稳定策略联切送端机组和受端部分负荷。利用该控制代价或负荷损失可反映直流故障对系统运行的影响,并将其作为故障筛选的依据之一。

1.4 连锁故障事故链风险评估

利用事故链概率和严重程度构建风险值进行风险评估。其中事故链概率 P_{event} 为:

$$P_{\text{event}} = \prod_{t=1}^N P_t \quad (9)$$

式中: N 为事故链级数; P_t 为第 t 级故障概率。

利用负荷损失表征连锁故障后果,并引入非线性效用函数。事故链严重程度 C_{event} 为:

$$C_{\text{event}} = e^{\frac{L_{\text{loss}}}{L_{\text{total}}}} - 1 \quad (10)$$

式中: L_{loss} 和 L_{total} 分别为负荷损失量和负荷总量; μ 为调节系数。

连锁故障事故链风险值 R_{event} 为:

$$R_{\text{event}} = P_{\text{event}} C_{\text{event}} \quad (11)$$

利用事故链风险值对搜索得到的连锁故障事故链进行评估、排序,筛选得到高风险连锁故障路径。

2 基于改进 Apriori 算法的故障关联分析

事故链集合作为潜在造成大停电事故的路径集,蕴藏着有价值的关联信息。利用搜索到的事故链集,采用数据挖掘的方法,从宏观上分析故障间的关联性,以针对威胁系统安全的关键环节制定控制策略。

Apriori 算法是一种关联规则挖掘算法^[22],善于挖掘离散型数据两项或多项之间的联系,被广泛应用于商业、网络安全等各个领域。所谓关联规则是指形如 $X \rightarrow Y$ 的蕴涵式,反映事物之间的相互依存性和关联性,且存在支持度和置信度两项评价指标,分别表示关联规则的可能性和信赖程度。

Apriori 算法通过扫描数据库,利用连接步—剪枝步操作搜索频繁项集。连接步是指 $k-1$ 阶频繁项集自身作连接产生候选 k 阶项集的过程;剪枝步是指对候选 k 阶项集进行验证,筛选出满足支持度要求的 k 阶频繁项集的过程。通过逐层搜索的迭代方法搜索得到所有频繁项集,并对频繁项集内部进行置信度计算,确定强关联规则。为适应连锁故障关联问题的特点,提出一种考虑项序和事务权重的 Apriori 算法进行故障关联分析。

已知一个包含 M 条故障路径的事故链集合 S :

$$\begin{cases} S = \{C_1, C_2, \dots, C_M\} \\ C_i = \{L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{iN}\} \end{cases} \quad (12)$$

式中: C_i 表示事故链 i ; L_{iN} 表示事故链 i 第 N 级故障元件。

将事故链集合 S 看作一个事务数据库,每一条事故链 C 是具有唯一标识的事务,系统中任一元件故障作为数据库中的项,不同故障的组合构成项集,项集中蕴涵式 $L_x \rightarrow L_y$ 表示故障组合 L_x 与 L_y 的关联规则。

事故链中的故障是按照顺序相继发生的,具备有序性。考虑项序的情况下,需满足支持度和置信

度计算时 $L_x \rightarrow L_y$ 对应到事故链中为相邻故障组合且故障级数 $t(x) < t(y)$;在连接步操作过程中,对于可连接的两个 $k-1$ 阶项集 I_1 和 I_2 ,需满足 I_1 的后 $k-2$ 个项与 I_2 的前 $k-2$ 个项对应相同。

为体现各事故链的价值差异,保证危及系统安全的关键环节有效筛出,将事故链归一化风险值作为事务权重系数计算项集支持度。

支持度和置信度分别为:

$$\text{Sup}(L_x \rightarrow L_y) = \frac{\sum_{i=1}^M R_{\text{event},i} f_i(L_x \rightarrow L_y)}{\sum_{j=1}^M R_{\text{event},j}} \quad (13)$$

$$\text{Con}(L_x \rightarrow L_y) = \frac{\text{Sup}(L_x \rightarrow L_y)}{\text{Sup}(L_x)} \quad (14)$$

式中: $\text{Sup}(L_x \rightarrow L_y)$ 和 $\text{Con}(L_x \rightarrow L_y)$ 分别表示关联规则 $L_x \rightarrow L_y$ 的支持度和置信度; M 为事故链数量; $R_{\text{event},i}$ 为事故链 i 的风险值; $f_i(L_x \rightarrow L_y)$ 为示性函数,若事故链 i 中先后出现 L_x 和 L_y 元件组合,则取1,否则取0。

通过连接步—剪枝步操作扫描出支持度大于最小支持度的频繁项集,即可筛选得到频繁关联的故障有序组合。对频繁项集内的关联规则计算置信度,可筛选出大于最小置信度的强关联规则,识别出具有强关联性的关键环节和故障演变规律。

3 算例分析

采用2018年山东电网规划方式进行仿真验证。仅对500 kV及以上电压等级系统进行分析,该系统包含90个节点和194条交流线路,系统结构如附录A图A1所示。山东电网通过4回500 kV和6回1 000 kV交流联络线与华北电网连接,且省内形成特高压交流环网,±660 kV宁东直流、±800 kV扎青直流和±800 kV昭沂直流3条直流馈入。高比例直流受电运行方式下,系统总负荷约56 GW,交流受电5.7 GW,宁东直流输送有功功率4 GW,扎青和昭沂直流均输送有功功率8 GW。利用式(7)求得3条直流换相失败保护阈值分别为0.79、0.77和0.77;利用文献[23]的方法求得3条直流多馈入临界短路比分别约为1.98、1.86和1.86,对短路故障进行仿真判断的多馈入短路比门槛值取2.50。假设交流短路故障类型均为三相短路接地,故障切除时间为0.1 s,保护拒动概率取0.001,后备保护0.35 s后动作,保护隐性故障概率 $p=0.01$;交流侧故障搜索过程中线路停运概率初筛阈值 P_{th} 取0.05,停运风险值聚类数取3, η_{th} 取1.20,事故链严重程度调节系数 μ 取20。事故链稳态搜索过程和故障关联分析利用MATLAB编程实现,动态仿真利

用电力系统分析综合程序 PSASP 实现。

3.1 连锁故障事故链搜索

以交流 500 kV 线路益都—管仲三永 N-1 作为初始故障时为例,按照所提模型进行连锁故障事故链搜索,可得到故障演化路径如表 1 所示。

表 1 益都—管仲为初始故障时的预测故障路径
Table 1 Forecast failure paths regarding branch Yidu-Guanzhong as initial failure

序号	连锁故障事故链
1	益都—管仲 ¹ →青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ →潍坊—临淄 ¹ →扎青直流闭锁
2	益都—管仲 ¹ →青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ →潍坊—益都 ¹ →扎青直流闭锁
3	益都—管仲 ¹ →济南—龙山 ¹ →闻韶—聊城 ¹ →柴府—聊城 ¹ →闻韶—蟠龙 ² →潍坊—临淄 ² →扎青直流闭锁
4	益都—管仲 ¹ →济南—龙山 ¹ →闻韶—聊城 ¹ →闻韶—蟠龙 ¹ →柴府—聊城 ² →潍坊—临淄 ² →扎青直流闭锁

注:上标 1 表示短路故障开断;上标 2 表示无故障跳闸开断。

当交流线路益都—管仲故障退出运行后,交流线路经概率初筛共 5 条线路进入第 2 级故障的备选线路集。其中青州—淄博退出后扎青直流逆变侧换流母线多馈入短路比变化量较大,该线路对直流影响度指标较高;济南—龙山处于省内东西重要输电通道上,具有较高的电气介数指标。将各备选线路的停运风险指标进行模糊聚类后,青州—淄博和济南—龙山处于最高一类,将两者分别作为第 2 级故障线路。按照该流程进行后续故障搜索,最终共得到 4 条故障演化路径。其中,表 1 中的事故链 1 和 2 经过前 3 级故障线路开断后,青州站多馈入短路比降至 2.11,此时交流系统对扎青直流的支撑能力较弱,经交流侧故障搜索可得第 4 级故障分别为潍坊—益都和潍坊—临淄三永短路故障开断,利用式(8)进行短路计算可知短路过程均会导致扎青直流换相失败,需对该短路过程进行短时仿真,判断是否触发直流闭锁。经仿真判断,短路故障清除后青州站电压难以恢复,导致扎青直流闭锁。事故链 3 和 4 经过交流线路连续开断后,东西输电通道变得狭长而薄弱,潮流重载导致青州站母线电压持续低于换相失败电压阈值,导致扎青直流闭锁。

对表 1 中 4 条事故链故障演化的全过程进行动态仿真验证,图 3(a)和(b)分别展示了事故链 1 故障演化过程中换流母线电压和直流功率变化情况。由图 3 可见,前 3 级故障的短路过程均触发了扎青直流换相失败,其中第 1 级和第 3 级故障导致扎青和宁东直流同时换相失败,由于此时电压支撑能力较强,短路电压和直流功率均能迅速恢复,未对系统运行造成严重影响。前 3 级交流线路开断使得扎青直流近区拓扑结构遭到严重破坏,系统强度被大幅

削弱,第 4 级故障中短路过程青州站换流母线电压难以恢复,扎青直流发生持续换相失败进而闭锁退出运行。

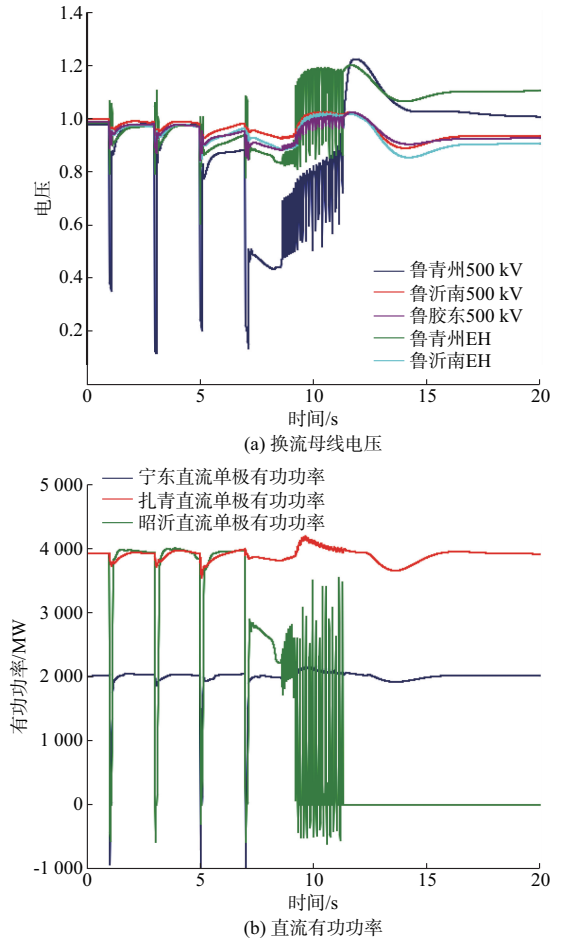


图 3 故障演化过程仿真曲线
Fig.3 Simulation curves of failure evolution

由仿真验证可知,表 1 中的事故链均正确判断出直流闭锁故障,利用所提搜索模型可有效搜索出直流退出运行的故障演化路径。其中事故链 1 和 2 中的直流闭锁由交流短路过程直接接触发,而事故链 3 和 4 中的直流闭锁由交流线路无故障跳闸开断直接接触发。因此将短路故障开断和无故障跳闸开断区分判断,可以较全面地涵盖导致直流退出运行的故障演化模式。

以益都—管仲三永 N-1 作为初始故障,若交流侧故障搜索时不计及支路对直流影响度和结构重要度因素,仅以停运概率最大为准则逐级搜索时得到的事故链为益都—管仲→济南—龙山→闻韶—聊城→柴府—聊城→聊城—长清→东阿—长清,未引发直流故障,事故链风险值仅为 0.000 015,小于表 1 中事故链的风险值。可见,计及支路重要度因素时可有效减少高风险事故链遗漏。为进一步说明所提

概率初筛后风险优先搜索策略(策略1)的高效性,设置穷举式搜索(策略2)进行对比。策略2具体方法为:对交流侧各级故障设置概率阈值,将大于概率阈值的所有线路分别作为下一级故障进行后续搜索。以益都—管仲为初始故障,按照策略2进行搜索时共得到3 355条事故链,其事故链风险值分布如图4所示。

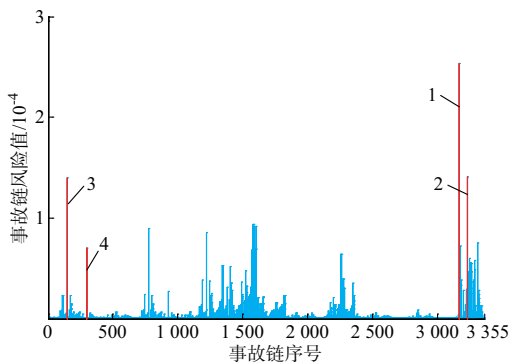


图4 策略2搜索所得事故链的风险值分布
Fig.4 Risk values distribution of event chains searched by strategy 2

图4中红色线表示按两种策略搜得事故链的重合部分,即表1中的4条事故链。其中的3条事故链风险值分别占按策略2搜索所得事故链的前3位,且领先幅度较大,其原因有:策略1中计及了支路对直流运行的影响度和结构重要度因素,在保证故障演化客观性的前提下使故障朝更坏方向发展,表1中的4条事故链均发生了直流闭锁故障,故障后果较严重;计及支路重要度因素后使部分关键线路被快速切除,加速了故障演化进程,使事故链长度得到有效缩短。因此,计及对直流运行影响度和结构重要度因素所形成的概率初筛后风险优先的搜索策略具有高效性。

计算正常运行方式下各交流线路的负载率、对直流运行影响度和结构重要度指标,并利用熵权法加权综合,得到脆弱线路排序。选择前50位脆弱线路分别作为初始故障,利用所提模型进行故障搜索,共得到273条事故链,对各事故链进行风险评估并按风险值进行排序,筛选出部分故障路径,见表2。

表2 山东电网连锁故障事故链排序结果
Table 2 Ranking result of event chains for cascading failures in Shandong power grid

排序	连锁故障事故链	概率/ 10^{-5}	严重度	风险值	仿真结果	仿真风险值
1	青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ → 益都—管仲 ¹ →潍坊—临淄 ¹ → 扎青直流闭锁	2.62	11.52	0.000 30	短路故障清除后青州站电压难以恢复致扎青直流闭锁,频率降至49.52 Hz,损失负荷6 697 MW	0.000 26
2	柴府—聊城 ¹ →闻韶—聊城 ¹ →济南—龙山 ¹ → 闻韶—蟠龙 ² →益都—管仲 ² →潍坊—临淄 ² → 扎青直流闭锁	2.38	12.45	0.000 29	局部失稳,青州站低压致扎青直流闭锁,频率降至49.48 Hz,失负荷7 154 MW	0.000 28
3	益都—管仲 ¹ →青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ → 潍坊—临淄 ¹ →扎青直流闭锁	2.22	11.52	0.000 26	短路故障清除后青州站电压难以恢复致扎青直流闭锁,频率降至49.52 Hz,损失负荷6 697 MW	0.000 22
4	莒南—沂南 I 线 ¹ →沂蒙—沂南 ¹ →莒南—沂南 II 线 ¹ → 日照—沂南 ¹ →鲁中—沂南 ² →沂南—密州 ² → 昭沂直流闭锁	1.95	11.27	0.000 22	沂南站出线连续开断致昭沂直流闭锁,频率降至49.54 Hz,损失负荷6 524 MW	0.000 18
5	青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ →益都—管仲 ¹ → 潍坊—益都 ¹ →扎青直流闭锁	1.66	11.87	0.000 20	短路故障清除后青州站电压难以恢复致扎青直流闭锁,频率降至49.50 Hz,损失负荷6 705 MW	0.000 17
6	青州—益都 I 线 ¹ →青州—淄博 ¹ →临淄—淄博 ¹ → 青州—益都 II 线 ¹ →青州—益都 III 线 ² → 青州—临淄 I 线 ² →扎青直流闭锁	1.41	11.80	0.000 17	青州站低压致扎青直流闭锁,频率降至49.50 Hz,损失负荷6 687 MW	0.000 14
11	大泽—胶东 ¹ →胶东—官亭 ¹ →崂山—胶东 I 线 ¹ → 崂山—胶东 II 线 ¹ →琅琊—胶东 I 线 ² → 宁东直流闭锁	6.88	2.27	0.000 16	胶东站低压致宁东直流闭锁,后局部失稳,频率降至49.72 Hz,失负荷3 056 MW	0.000 14
143	昌乐特—昌乐 ¹ →昌乐—乔官 I 线 ¹ → 昌乐—乔官 II 线 ¹ →大泽—胶东 ¹ →潍坊—官亭 ¹ → 潍坊—大泽 ¹ →沂蒙—沂南 ¹ →新泰—鲁中 ¹ → 崂山—胶东 I 线 ¹ →崂山—胶东 II 线 ² → 胶东—官亭 ² →密州—琅琊三永拒动→ 昭沂、宁东直流同时闭锁	0.000 0394	59.77	2.4×10^{-8}	主保护拒动后沂南站、胶东站短路电压难以恢复,致昭沂、宁东直流同时闭锁,后局部失稳,频率降至49.32 Hz,损失负荷10 802 MW	1.83×10^{-8}

注:上标1表示短路故障开断;上标2表示无故障跳闸开断。

表 2 展示了山东电网部分连锁故障事故链。其中事故链 143 中,直流近区大量交流线路连续开断后系统支撑强度较弱,当主保护拒动后沂南、胶东电压难以恢复,导致两条直流同时闭锁。此类故障具有严重后果,但由于概率较低,故风险值并不高。对筛选得到的事故链故障演化全过程进行仿真验证,结果表明,所提连锁故障搜索方法能有效搜索出直流退出运行的故障演化路径。考虑失稳解列、低频减载等安稳措施,得到各故障过程中的失负荷量,计算得到仿真条件下的事故链风险值。可见,所得风险值按事故链序列大体呈递减趋势,且与利用搜索模型所得风险值基本一致,因此该搜索模型可用于高风险故障路径筛选。

3.2 基于事故链的故障关联分析

利用搜索得到的山东电网事故链进行故障关联分析,支持度阈值取 0.05,置信度阈值取 0.3,部分频繁项集与强关联规则如表 3 所示。

表 3 故障关联分析结果
Table 3 Results of failure correlation analysis

类型	关联规则	支持度	置信度
二阶项集	青州—淄博→临淄—淄博	0.154	0.637
	益都—管仲→潍坊—临淄	0.148	0.440
	沂蒙—沂南→日照—沂南	0.122	0.462
	日照—沂南→鲁中—沂南	0.098	0.374
	大泽—胶东→胶东—官亭	0.093	0.754
三阶项集	济南—龙山, 闻韶—蟠龙→益都—管仲	0.065	0.877
	日照—沂南, 鲁中—沂南→沂南—密州	0.061	0.622
	临淄—淄博, 青州—淄博→益都—管仲	0.060	0.644
四阶项集	济南—龙山, 闻韶—蟠龙, 益都—管仲→潍坊—临淄	0.053	0.815
	临淄—淄博, 青州—淄博, 益都—管仲→潍坊—临淄	0.050	0.833

表 3 展示了系统中部分频繁项集和强关联规则。以“青州—淄博→临淄—淄博”为例,该关联组合在表 2 的事故链 1, 3 和 5 中均出现过,且为支撑扎青直流运行的重要断面,若该故障组合相继发生,将严重削弱系统强度,加剧扎青直流闭锁风险。因此,利用该关联分析算法可有效识别危及系统安全的关键环节,为制定阻断控制措施提供支撑。与一般 Apriori 算法相比,将事故链归一化风险值作为事务权重,突出了高风险事故链信息价值,有利于提取威胁系统安全的高风险故障演变模式;考虑故障项序,避免了支持度的夸大以及冗余无效规则的误筛。因此,利用所提改进 Apriori 算法进行关联分析可行。

4 结语

本文提出了一种用于故障快速筛选的交直流混

联系统连锁故障搜索模型与基于改进 Apriori 算法的故障关联分析方法。在交流侧故障搜索过程中计及了支路对直流影响度和结构重要度的影响,形成概率初筛后风险优先的搜索策略,使搜索过程向故障风险较大的方向引导;根据有无短路过程将交流故障区分开,分别考虑与直流系统的交互影响,较全面地涵盖了直流退出运行的故障演化模式。故障关联分析方法可计算多重故障之间的关联性,在 Apriori 算法中考虑项序和事务权重,可保证危及系统安全的故障组合和强关联规则有效筛出。仿真分析表明,搜索模型可高效搜索出直流退出运行的故障路径,适用于故障快速筛选工作,并在一定程度上减少了高风险事故链的遗漏;故障关联分析方法能有效识别威胁系统安全的强关联规则。

为保证连锁故障的快速搜索和筛选,本文在搜索过程中未全面考虑各级故障的暂态过程,且忽略了系统功角振荡过程中低压导致直流闭锁的情况。如何在故障搜索过程中兼顾精度、速度和广度将是下一步研究的重点。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 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 systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 1-9.
- [2] FANG Y. Reflections on stability technology for reducing risk of system collapse due to cascading outages[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 264-271.
- [3] MEI S, HE F, ZHANG X, et al. An improved OPA model and blackout risk assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 814-823.
- [4] 曹一家, 王光增, 曹丽华, 等. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态判断模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 1-6.
CAO Yijia, WANG Guangzeng, CAO Lihua, et al. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 1-6.
- [5] FAN W, ZHANG X, MEI S, et al. Vulnerable transmission line identification considering depth of K-shell decomposition in complex grids [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2018, 12(5): 1137-1144.
- [6] DEY P, MEHRA R, KAZI F, et al. Impact of topology on the propagation of cascading failure in power grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1970-1978.
- [7] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.

- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [8] 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.
- [9] 张娟,童晓阳,姜建伟.基于渗流和风险理论的电力系统连锁故障分析[J].电力系统自动化,2017,41(5):46-52.DOI:10.7500/AEPS20160515013.
ZHANG Juan, TONG Xiaoyang, JIANG Jianwei. Analysis on power system cascading failure based on percolation and risk theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 46-52. DOI: 10.7500/AEPS20160515013.
- [10] 丁明,钱宇骋,张晶晶.考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5902-5911.
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5902-5911.
- [11] 屠竞哲,甘德强,于洋,等.直流输电对交直流互联系统自组织临界性的影响分析[J].电力系统自动化,2012,36(11):7-13.
TU Jingzhe, GAN Deqiang, YU Yang, et al. DC transmission impact analysis on AC/DC interconnected system self-organized criticality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 7-13.
- [12] 陈树勇,高鸿飞,杨琦,等.基于BPA动态潮流的多直流馈入电网多重故障集构建[J].中国电机工程学报,2016,36(S1):10-20.
CHEN Shuyong, GAO Hongfei, YANG Qi, et al. Constructing fault sets of multiple serious faults in multi-infeed DC power grid based on BPA dynamic power flow [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 10-20.
- [13] 余晓鹏,张雪敏,钟雨芯,等.交直流系统连锁故障模型及停电风险分析[J].电力系统自动化,2014,38(19):33-39.DOI:10.7500/AEPS20130905003.
YU Xiaopeng, ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin, et al. Cascading failure model of AC-DC system and blackout risk analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 33-39. DOI: 10.7500/AEPS20130905003.
- [14] QI J, SUN K, MEI S. An interaction model for simulation and mitigation of cascading failures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2): 804-819.
- [15] 肖遥,过羿,谢佳,等.基于Apriori算法的连锁故障机理研究[J].电力学报,2017,32(1):22-27.
XIAO Yao, GUO Yi, XIE Jia, et al. Research on the mechanism of cascading failure based on Apriori algorithm [J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(1): 22-27.
- [16] 沈智健,熊小伏,周家启,等.继电保护系统失效概率算法[J].电力系统自动化,2009,33(23):5-8.
SHEN Zhijian, XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, et al. An algorithm for relay protection system failure probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(23): 5-8.
- [17] 周勤勇,杨冬,刘玉田,等.多直流馈入电网限制短路电流方案多目标优化[J].电力系统自动化,2015,39(3):140-145.DOI:10.7500/AEPS20131118001.
ZHOU Qinyong, YANG Dong, LIU Yutian, et al. Multi-objective optimization for short-circuit current limitation schemes in multiple DC infeed power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 140-145. DOI: 10.7500/AEPS20131118001.
- [18] 薛禹胜,戴元煜,于继来,等.可信度控制下的相继开断潮流快速计算[J].电力系统自动化,2015,39(22):37-45.DOI:10.7500/AEPS20150214002.
XUE Yusheng, DAI Yuanyu, YU Jilai, et al. A credibility index based algorithm for fast estimating power flow in cascading failures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 37-45. DOI: 10.7500/AEPS20150214002.
- [19] 肖浩,李银红,于芮技,等.影响多馈入直流系统换相失败率的电网薄弱区域快速识别方法[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1781-1789.
XIAO Hao, LI Yinhong, YU Ruiji, et al. A rapid identification method of weak areas in power grid based on commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1781-1789.
- [20] QI J, MEI S, LIU F. Blackout model considering slow process [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3274-3282.
- [21] 谢岩,唐晓骏,赵李宏,等.基于短路比滚动评估的直流系统退出运行故障集建立方法[J].高电压技术,2015,41(10):3484-3490.
XIE Yan, TANG Xiaojun, ZHAO Lihong, et al. Failure set establishment method of DC system quitting operation based on short circuit ratio rolling evaluation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3484-3490.
- [22] 陈安,陈宁,周龙骧.数据挖掘技术与应用[M].北京:科学出版社,2006.
CHEN An, CHEN Ning, ZHOU Longxiang. Data mining technology and its application [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [23] 张啸虎,陈陈.多馈入直流系统区域最大传输功率算法[J].中国电机工程学报,2017,37(8):2196-2202.
ZHANG Xiaohu, CHEN Chen. Algorithm of regional maximum available power for multi-infeed HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2196-2202.

李文博(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: liwb@mail.sdu.edu.cn

朱元振(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: zhuyuanzhen@mail.sdu.edu.cn

刘玉田(1964—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行与控制。E-mail: liyt@sdu.edu.cn

(编辑 章黎)

Search Model and Correlation Analysis for Cascading Failures in AC/DC Hybrid Power System

LI Wenbo, ZHU Yuanzhen, LIU Yutian

(Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education (Shandong University), Jinan 250061, China)

Abstract: With the ever-increasing large-scale HVDC transmission systems, the coupling problem between AC and DC systems is outstanding, which increases the risk of cascading failures. An event chain search model for fast contingency screening in the AC/DC hybrid power system is proposed, which includes the AC outage search model and the judgment module of the occurrence of DC faults. In the AC outage search model, the influence on the operation of DC systems and structural importance of lines is considered and a novel search strategy in the AC grid which is based on outage risk index after preliminary screening by outage probability value is put forward. In the judgment module of the occurrence of DC faults, the short-circuit faults and the overload trips in the AC grid are set apart considering the interactions with DC systems. In addition, a method of correlation analysis for cascading failures based on the modified Apriori algorithm considering the order of items and the weight of transaction is proposed to select the strong association rules endangering system security. Finally, simulation results demonstrate that the event chain search model can search the fault paths effectively in which DC systems are out of operation and reduce the omission of high-risk chains, and the method of correlation analysis can identify the strong association rules that endanger system security.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFB0902600) and State Grid Corporation of China (No. SGJS0000DKJS1700840).

Key words: AC/DC hybrid power system; cascading failure; event chain; failure correlation analysis