

DOI: 10.7667/PSPC180473

高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究

王超¹, 常海军¹, 摆世彬², 李兆伟¹, 田志浩², 刘福锁¹, 李威¹, 宋晓芳¹

(1. 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 211106;

2. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 高比例新能源与多直流共存环境下系统扰动导致新能源与交直流深度耦合, 连锁故障模式及演化过程更加复杂多变, 需进一步深入研究其连锁故障风险及防控策略。首先, 为充分考虑实际控制保护装置动作与系统电气量的交互影响, 采用基于控制保护装置动作评估指标的时域仿真方法搜索高风险事故链。在此基础上, 提出基于事故链信息的紧急控制思路, 对可演化为连锁事故但自身无紧急措施的单个扰动配置紧急措施, 加强和完善现有紧急控制体系对连锁事故链的阻断能力。以系统总风险代价最小为目标对预防控制和紧急控制进行协调优化, 给出了协调控制优化模型与实现方案。最后, 基于西北电网高比例新能源与多直流送出实际电网数据的仿真结果, 验证了所提控制思路与控制方法的有效性。

关键词: 高比例新能源; 多直流; 连锁故障; 控制策略

Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy

WANG Chao¹, CHANG Haijun¹, BAI Shibin², LI Zhaowei¹, TIAN Zhihao², LIU Fusuo¹, LI Wei¹, SONG Xiaofang¹

(1. NARI Group Corporation /State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China;

2. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

Abstract: Cascading failure mode and evolution process is much more complex and changeable because of the much coupling between the renewable generation and the AC/DC power system after system disturbance. Further research of the risk assessment and control strategy of this kind of cascading failure is required. Firstly, in order to fully consider the interaction between the practical control and protection devices action and system electrical quantities, time domain simulation method based on evaluation index of security devices such as relay devices is used to search fault chains with high risk. Secondly, a new emergency control method based on fault chain information is proposed, to set up emergency control measures for single disturbance that can evolve into cascading fault chains but without emergency control measures. This new control method can further strengthen and perfect the ability to block the fault chain of cascading failure of current emergency control system. Aiming at minimizing the total risk cost of control, the coordination and optimization of preventive control and emergency control are carried out, and the coordinated control optimization model and implementation program are given respectively. Finally, simulation results and analysis based on real-sized power grid in Northwest China prove the rationality and effectiveness of the proposed control method.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229NX16001D) "Study on the Practical Prevention and Control Strategy of Cascading Failures of Ningxia Sending end Power Grid with Multi-HVDC and High Proportion of Renewable Energy".

Key words: high proportion of renewable energy; multi-HVDC system; cascading failure; control strategy

0 引言

特高压直流输电与新能源技术的快速发展, 实

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5229NX16001D)“宁夏多直流与高比例新能源共存送端电网连锁故障防控实用化技术深化研究”

现了大范围能源资源优化配置功能, 满足了清洁能源送出、节能减排等方面的迫切需求^[1-5]。截止2017年底, 西北电网已投运8回直流, 总额定容量超过4000万kW, 同时大规模新能源集群汇集于直流集群的近区, 以哈密酒泉、宁夏两大直流群为例, 近区汇集了西北全网58%的新能源^[6]。

然而根据国家能源局《关于进一步调控煤电规

划建设的通知》，当前相当一段时间内我国特高压直流输电工程配套火电建设将全面滞后，导致系统的调频调压能力较弱^[7]，即为弱同步电网，此外新能源涉网能力不足的约束仍然存在。多直流与新能源之间交互耦合，导致系统连锁故障模式及演化过程更加复杂，亟需进一步研究新能源与多直流共存环境下连锁故障演化机理及防控策略。

目前已有的连锁故障分析模型种类繁多，功能各异^[8]，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，可将连锁故障的监控转化为对事故链环节的监控，为连锁故障分析与控制提供了一个可工程应用的方法^[9-10]。但由于电网规模庞大且事故诱因多样，如何提高事故链搜索速度以及确定后续环节一直是研究重点^[11]。文献[12]提出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，基于控制保护装置动作的评估指标，定义故障发生概率与评估指标线性关系的定义比较粗糙，未能细化研究控制保护装置满足动作条件但处于临界状态附近时的隐性故障概率。

“三道防线”的配置情况是影响连锁故障演化进程的关键因素，已有不少文献进行了研究^[13-16]。但在规模化新能源与多直流送出电网场景下，按照现有控制配置原则，某些扰动(如直流换相失败、风机脱网等)下无紧急控制措施，但该扰动也有可能进一步导致后续扰动，进而引发连锁故障，按照现有配置情况最终会错失控制时机，大大增加了系统损失。有必要对此类可演化为连锁事故但自身无紧急措施的单个扰动配置紧急措施，从而对现有第二道防线进行补充与完善，进一步增强第二道防线紧急控制对连锁故障演化进程的阻断能力。但尚无相关文献报道。此外，针对连锁故障的防控，若孤立地研究预防控制与紧急控制，则忽略了二者在经济性与安全性上的互补特性^[17]。有必要深入研究二者协调控制方法在新能源与多直流场景下连锁故障防控中的应用。

本文以西北电网高比例新能源与多直流为研究背景，首先基于文献[12]，优化故障概率与控制保护装置动作评估指标之间的计算关系，以便更多考虑装置的隐形故障；在此基础上，基于现有三道防线控制体系，提出基于事故链信息的紧急控制思路，进一步增强了现有第二道防线紧急控制对连锁故障演化进程的阻断能力；最后以系统总风险代价最小为目标，协调优化预防控制和紧急控制，给出了协调控制策略的搜索原则与实现方案。研究结论

对高比例新能源与多直流场景下的连锁故障风险防控具有一定指导意义。

1 连锁故障模式搜索

事故链理论认为电力系统连锁故障是由具有一定相关性的相继故障共同促成的，下一故障是否发生与电网的运行工况、保护控制装置可靠性等因素相关。

假设电网具有 u 个连锁故障事故链，则事故链集合和单个事故链可表示为

$$L = \{L_1, L_2, \dots, L_u\} \quad (1)$$

$$L_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{iv}\} \quad (2)$$

式中， T_{ij} 为第 i 条事故链的第 j 个故障环节， $j=1, 2, \dots, v$ 。事故链逻辑如图 1 所示。

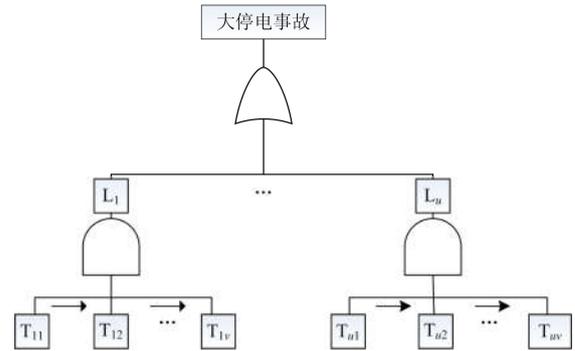


图 1 连锁故障事故链模型

Fig. 1 Fault chain model of cascading failure

基于时域仿真进行事故链搜索可以考虑实际电气量的变化情况及其与控制保护装置的交互耦合情况，能更真实地反映实际大电网的连锁故障演化进程。事故链搜索的难点在于选择后续事件，本文采用基于控制保护装置动作评估指标的后续事件预判方法，适用于所有基于电气量越限并满足特定时限后触发保护动作的情况。

假设控制保护装置的判据为多个二元表(如风机高、低压穿越保护定值) $[(E_{cr,1}, T_{cr,1}), (E_{cr,2}, T_{cr,2}), \dots, (E_{cr,i}, T_{cr,i})]$ ，为不失一般性，借鉴暂态频率偏移可接受性的定量分析思想^[15]，引入换算因子 k ，将 2 维的临界条件 $(E_{cr,i}, T_{cr,i})$ 折算成 1 维的临界条件 $(E'_{cr,i}, 0)$ ，即 $E'_{cr,i} = E_{cr,i} - kT_{cr,i}$ ，以提升裕度-参数关系曲线的线性度与光滑度。其中， $E_{cr,i}$ 、 $T_{cr,i}$ 分别为保护控制装置动作的阈值与持续时间。

定义控制保护装置动作的评估指标 λ 为

$$\lambda = E_{cr,\min} - E'_{cr,i} \quad (3)$$

式中， $E_{cr,\min}$ 为动态过程中电气量最小值。评估指

标 λ 的物理意义为:

- 1) $\lambda > 0$, 表示控制保护装置不满足动作条件, 且 λ 越大, 离动作边界越远, 不动作的确定性越大;
- 2) $\lambda < 0$, 表示控制保护装置满足动作条件, 且 λ 越小, 动作的确定性越大;
- 3) $\lambda = 0$, 表示控制保护装置处于临界动作状态, 此时较容易发生隐性故障。

此外, 不管是电气量越上限还是越下限, 控制保护装置动作的评估指标计算公式均如式(3)所示, 是统一的^[18]。

基于控制保护装置动作的评估指标, 定义所对应的故障概率计算公式为

$$p(\lambda) = \begin{cases} p_a & \lambda \leq -\lambda_{\text{ref}} \\ \frac{p_b - p_a}{2\lambda_{\text{ref}}}\lambda + \frac{p_a + p_b}{2} & |\lambda| < \lambda_{\text{ref}} \\ p_b & \lambda \geq \lambda_{\text{ref}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\lambda_{\text{ref}} > 0$ 为评估指标的设定阈值; p_a 为控制保护装置正确动作的概率; p_b 为控制保护装置发生隐性故障的概率(不考虑隐性故障时, $p_a = 1, p_b = 0$), p_a 和 p_b 值可以通过历史统计数据获取。 $p(\lambda)$ 的物理意义如下:

- 1) $\lambda \geq \lambda_{\text{ref}}$, 评估指标大于正阈值, 此时故障发生的概率由控制保护装置的隐性故障概率决定;
- 2) $\lambda \leq -\lambda_{\text{ref}}$, 评估指标小于负阈值, 此时故障发生的概率由控制保护装置的正确动作概率决定;
- 3) $|\lambda| < \lambda_{\text{ref}}$, 评估指标在正负阈值区间内, 此时故障发生的概率由保护控制装置正确动作概率与隐性故障概率共同决定。

故障发生概率与控制保护装置动作评估指标的关系如图 2 所示。

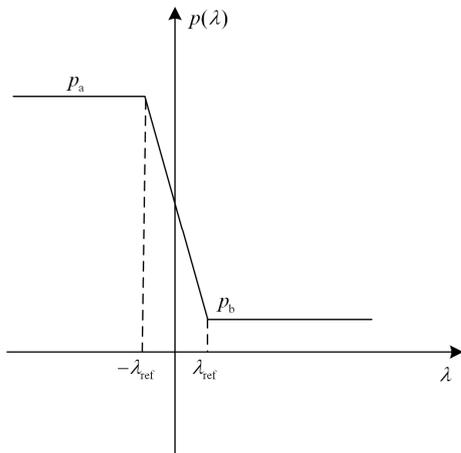


图 2 保护控制动作评估指标与故障概率关系

Fig. 2 Relationship between protection control devices action evaluation index and fault probability

基于控制保护装置动作评估指标的故障链搜索流程如图 3 所示。

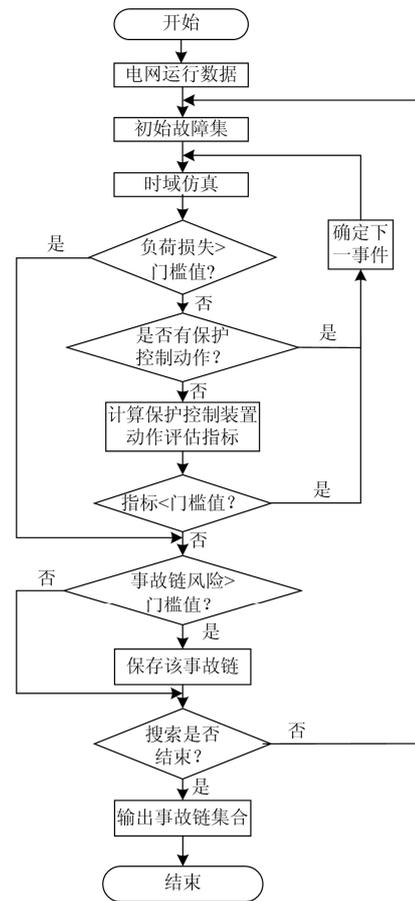


图 3 事故链搜索流程

Fig. 3 Searching process of fault chains

2 基于事故链信息的紧急控制思路

“三道防线”配置情况是影响大电网连锁故障演化进程的关键因素。然而在某些工况下相继发生多个扰动, 最终可能演化为导致系统失稳的连锁事故。若相继发生的多个扰动均未配置紧急控制措施, 即在多个扰动相继发生过程中无任何紧急控制措施, 将导致连锁故障的演化进程不能被及时阻断, 错失控制时机, 需要被动地等待第三道防线校正控制动作, 最终后果为系统损失量大大增加。

基于此, 本文提出基于事故链信息的紧急控制思路, 及时阻断连锁事故链, 减小系统损失。如图 4 所示。其实现步骤如下。

1) 基于实际电网数据, 采用专家经验确定初始故障集, 采用基于控制保护装置动作评估指标的时域仿真方法离线计算搜索出高风险连锁故障事故链集合 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_u\}$ 。

2) 结合现有紧急控制系统配置情况, 从事故链

集合 L 中筛选出那些前两个事件均未配置紧急控制措施的事故链集合 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_m\}$ ，其中第 i 条事故链 $N_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{in}\}$ ，事件 S_{i1} 、 S_{i2} 未配置紧急控制措施。

3) 采用离线计算方法，对筛选出的每一个事故链 N_i 中的第 2 个事件 S_{i2} 进行紧急控制策略计算，保证该紧急控制策略 C_i 可以阻断该事故链 N_i 的演化进程。

4) 由于事故链每一事件的发生均存在一定的不确定性，即事件 S_{i1} 的发生并不意味着后续事件 S_{i2} 的必然发生，为避免过分控制，紧急控制系统检测到事故链 N_i 的第 1 个事件 S_{i1} 与第 2 个事件 S_{i2} 相继确定发生之后，触发紧急控制策略 C_i ，阻断连锁事故链 N_i ，这样兼顾了控制的经济性与时效性。当然运行方式的实时匹配是紧急控制措施执行的必要条件。

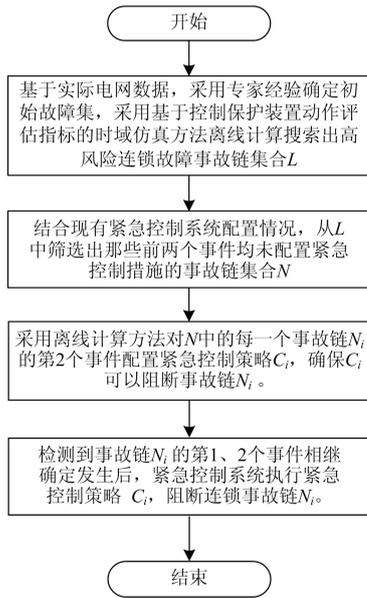


图 4 基于事故链信息的紧急控制思路

Fig. 4 Emergency control based on fault chains information

3 风险评估

3.1 故障概率

以事故链 L_1 为例，该事故链有 v 个相继故障，则该连锁故障事故链的发生概率为

$$p_{L_1} = p_1 p_2 \cdots p_v \quad (5)$$

式中： p_1 为初始故障概率； $p_j (j > 1)$ 为前述故障(即前 $j-1$ 次故障)均已发生的条件下当前故障的概率。

3.2 故障后果

采用使系统稳定的最小控制代价来反应连锁

故障后果，不但可以避免估计预想故障的负荷损失及停电时间，也更符合实际情况^[19]。

3.3 风险计算

由此，可将连锁故障风险定义为：使系统稳定的最小控制代价与故障发生概率的乘积。

连锁故障 L_1 的停电风险为

$$R_{L_1} = p_{L_1} C_{L_1} \quad (6)$$

式中： R_{L_1} 为风险； p_{L_1} 为连锁故障 L_1 停电的概率； C_{L_1} 为最小控制代价。

4 协调控制技术

预防控制措施实施于连锁故障路径触发之前，其对后续所有故障均起作用，可以充分减小故障对系统的影响，但不同后续故障对预防控制提出的要求可能具有矛盾性，因此仅仅依靠预防控制来降低风险的效果不一定理想。而紧急控制是在连锁故障路径触发后实施，此时故障已经对系统产生了比较大的影响，其控制量往往也较大。

通过在故障发生前采取预防控制，可以减少故障后所需的紧急控制量，降低控制成本；而通过在故障发生后采取紧急控制，可以缓解预防控制的矛盾，提高控制措施降低系统总体风险的能力，因此预防控制和紧急控制具有很强的互补性。二者的控制逻辑框图如图 5 所示。

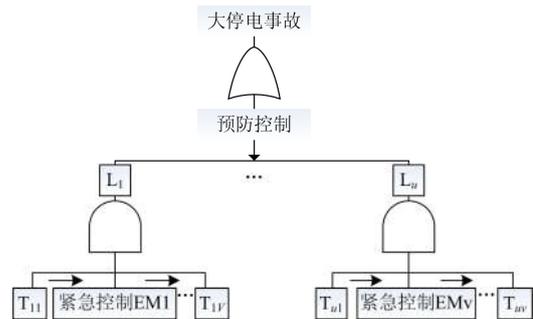


图 5 大停电事故、连锁故障序列与协调控制逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of blackouts, cascading failures chains and coordinated control

4.1 控制优化模型

预防控制付出的代价与故障是否发生无关，而紧急控制则只有在扰动确实发生时才付出代价。预防控制与紧急控制决策的协调问题是混合型的非线性规划。假设通过预防控制 P ，将系统运行点由给定点 x_0 移到靶点 x_T 。 x_T 对于某些扰动可能仍然不稳定，所以一旦发生危及系统安全的扰动 i 时，立即执行专门针对该扰动的紧急控制 e_i ，以保证系统

的稳定性。因此, 协调的目标是使从 x_0 到靶点 x_T 的预防控制代价和 x_T 对应的各紧急控制代价的概率加权之和为最小, 其数学模型可表示为

$$\min C(x_T) = \min(C_p(x_T) + C_e(x_T, e)) = \quad (7)$$

$$\min(C_p(x_T) + \sum_{i=1}^{n_r} \alpha_i C_{ei}(x_T, e_i)) \quad (8)$$

$$\text{s.t. } g(x_T) = 0 \quad (8)$$

$$h(x_T, e) \geq 0 \quad (9)$$

式中: C (或 C_p) 为一年中稳定控制的总代价 (或预防控制代价); C_e (或 C_{ei}) 为紧急控制 e (或 e_i) 的代价; e_i 及 α_i 分别表示针对第 i 种扰动的紧急控制措施及期望次数; n_r 为需要考虑的扰动场景总数。式(8)为运行的等式约束, 如潮流方程; 式(9)包含控制量的容量限制和对稳定裕度的要求, 后者必须通过稳定分析来判断。文献[20]按照“解耦迭代(局部优化), 聚合协调(全局优化)”的优化策略对此混合规划进行了求解。

4.2 协调控制系统方案实现

协调控制系统采用三层控制结构, 由四个功能模块组成: 预防控制模块、紧急控制模块、协调控制模块与控制执行模块, 如图 6 所示。

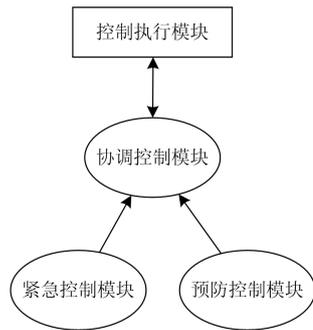


图 6 协调控制系统结构

Fig. 6 Coordinated control system structure

预防控制模块的功能为基于高风险事故链信息, 识别关键断面或相关直流, 计算预防控制措施及可控容量, 并上送至协调控制模块。

紧急控制模块的功能为基于高风险事故链信息, 搜索可控的紧急控制措施及可控容量, 基于 EEAC 理论, 选择性价比最高的作为候选措施, 并上送至协调控制模块。需要说明的是, 搜索的紧急控制措施已包含采用第 2 节中所述控制思路配置的措施, 使得控制措施更加完备。

协调控制模块的功能为接收紧急控制模块与预防控制模块上送的策略信息, 基于既定算法进行

协调优化, 发送控制命令至控制执行模块执行, 同时接收控制执行模块上送的实际可控量信息。

控制执行模块的功能是将当前工况下的可控控制措施及实际的可控控制量信息上送至协调控制模块, 并接受其下发的控制指令。协调控制的具体流程如图 7 所示。

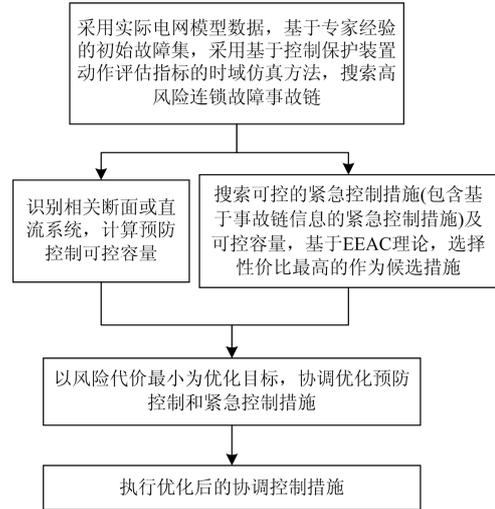


图 7 协调控制流程

Fig. 7 Process of coordinated control system

5 算例分析

基于某年西北电网(图 8)实际数据, 考虑较严重运行方式安排: 银东直流 4 000 MW、昭沂直流 7 000 MW、灵绍直流 8 000 MW, 宁夏受入 7 000 MW, 新疆外送 4 000 MW。风机高压脱网定值为 (1.15 p.u., 0 s)。

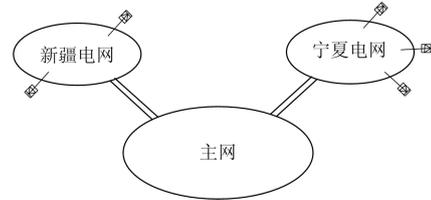


图 8 西北电网结构简图

Fig. 8 Simple diagram of Northwest Power Grid

5.1 连锁故障演化算例

基于西北电网实际数据及相关控制保护定值, 采用基于控制保护装置动作评估指标的故障链搜索方法, 可搜索得出初始故障起源于宁夏电网的连锁故障事故链集合。

以昭沂、银东直流同时 2 次换相失败导致的连锁故障为例, 该事故链存在 5 个相继事件(T1~T5), 具体演化过程如图 9 所示。

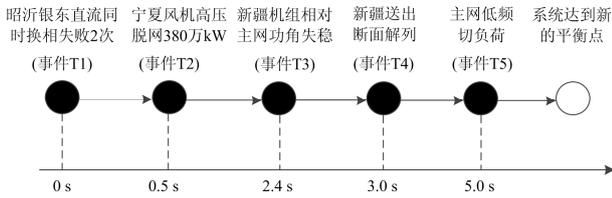
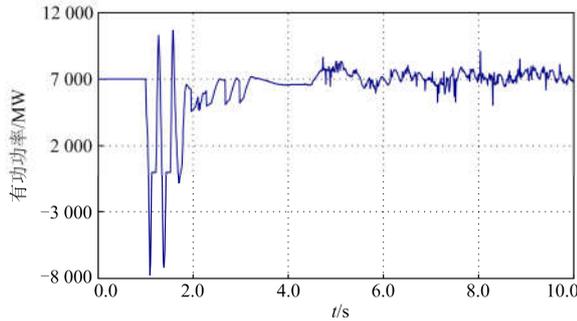
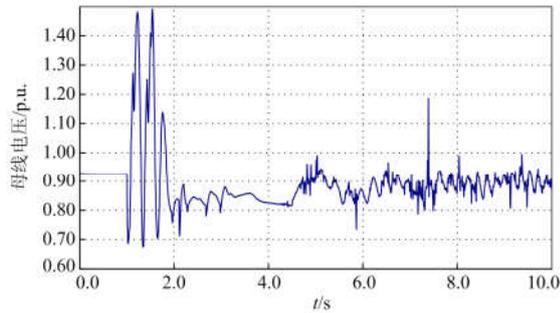


图 9 昭沂、银东直流同时换相失败 2 次导致的连锁故障
 Fig. 9 Cascading failure caused by twice simultaneous commutation failure of Zhaoyi and Yindong UHVDC

连锁故障演化进程中各阶段系统相应如图 10 所示。宁夏送出直流昭沂、银东连续 2 次换相失败引发宁夏风机脱网容量 3 800 MW。



(a) 昭沂直流功率



(b) 500 kV 伊克昭换流站电压

图 10 昭沂、银东直流连续 2 次换相失败系统响应曲线
 Fig. 10 System response during twice simultaneous commutation failure of Zhaoyi and Yindong HVDC

风机大规模脱网后，随着直流换相失败的恢复，新疆与西北主网送出通道潮流大幅度反复振荡，导致新疆机组相对主网功角失稳。新疆机组相对西北主网的功角曲线如图 11 所示。

功角失稳后，新疆外送断面主动解列，西北主网功率缺额 800 万 kW 左右，出现低频问题。新疆外送断面解列后西北主网频率如图 12 所示。

5.2 基于事故链信息的紧急控制

结合以上连锁故障演化过程，若基于现有紧急控制配置，从昭沂、银东直流发生 2 次换相失败(事件 T1)到新疆机组功角失稳(事件 T3)，此段过程中

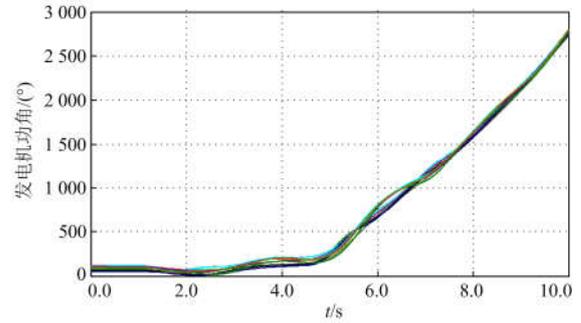


图 11 新疆机组相对西北主网的功角曲线

Fig. 11 Rotor angle of generators in Xinjiang power grid

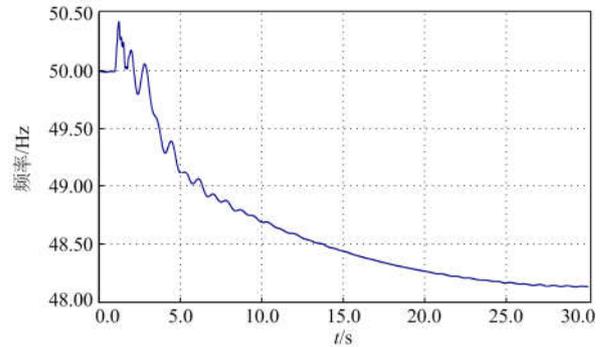


图 12 新疆外送断面解列后西北主网频率

Fig. 12 Frequency of power system after active splitting of Xinjiang AC transmission section

无任何紧急控制措施，只能被动地等待新疆外送断面主动解列(事件 T4)，导致西北电网损失严重。

采用本文所提的基于事故链信息的紧急控制思路进行紧急控制配置，紧急控制系统在实时匹配运行方式基础上，监测到事件 T1 与事件 T2 确定发生后，立即启动紧急控制措施(如速降直流)，可避免事件 T3 发生，有效阻断连锁故障演化进程，从而降低了系统损失。仿真结果如图 13、图 14 所示。

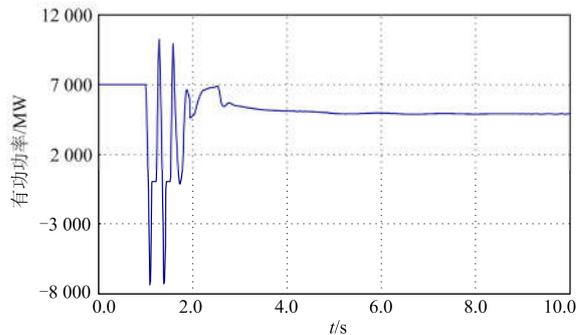


图 13 基于事故链信息紧急速降昭沂直流

Fig. 13 Emergency power support of Zhaoyi HVDC based on fault chain information

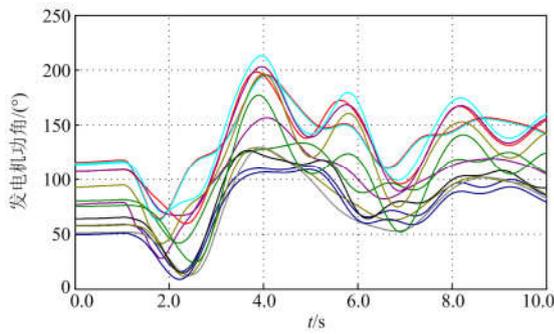


图 14 基于事故链信息紧急速降昭沂直流后新疆机组功角
Fig. 14 Rotor angle of generators in Xinjiang power grid after emergency power support of Zhaoyi HVDC based on fault chain information

5.3 基于风险的协调控制

基于事故链信息的紧急控制可以有效阻断连锁故障进程,但从控制代价角度来看不一定是最优方案,须对预防控制与紧急控制进行协调。

控制措施备选空间: 预防控制 k_{p1} : 预控新疆外送断面功率; 预防控制 k_{p2} : 预控昭沂直流外送功率; 紧急控制 k_{p3} : 宁夏直流紧急功率回降; 紧急控制 k_{p4} : 宁夏地区紧急切负荷。

采用 EEAC 量化分析紧急控制措施 k_{p3} 与 k_{p4} 的控制性价比,结果如表 1 所示。可以看出 k_{p3} 紧急直流功率回降性价比更高,将其作为待优化的紧急控制措施。

表 1 不同紧急控制措施性价比分析

初始系统稳定裕度	采取措施量及系统裕度	采取措施的代价/万元	性价比
-75.80	n1: 1 000 MW, -2.83	60.0	1.216 1
	n2: 500 MW, -45.45	60.0	0.505 8

为计算控制代价,将新疆外送断面功率 4 000 MW(P_1^*),昭沂直流外送 7 000 MW(P_2^*)设定为运行中的预定目标功率。假设控制代价: 新疆断面功率预控代价 0.05 万元/MW(C_{p1}), 直流外送功率预控代价 0.04 万元/MW(C_{p2}), 直流功率紧急回降代价 0.6 万元/MW(C_{p3}), 紧急切负荷代价 1.2 万元/MW(C_{p4})。根据历史统计数据,事件 T1 概率设为 0.100(p_1),在事件 T1 发生的条件下事件 T2 的概率设为 0.999(p_2)。

事件 T1、T2 发生后的控制代价为

$$R = (P_1^* - P_1) \cdot C_{p1} + (P_2^* - P_2) \cdot C_{p2} + p_1 \cdot p_2 \cdot P_3 \cdot C_{p3} \quad (10)$$

其中: P_1 、 P_2 为新疆外送断面、昭沂直流预防控制功率实施量; P_3 为昭沂直流紧急回降功率量。

不同控制组合如表 2 所示,不同控制组合的风险控制代价如表 2、图 15 所示。

表 2 不同控制组合

Table 2 Different control combinations

方案序号	MW		
	新疆外送	昭沂直流外送	紧急回降功率
1	4 000	7 000	2 500
2	4 000	6 400	1 800
3	4 000	5 800	800
4	3 600	7 000	2 200
5	3 600	6 400	1 500
6	3 600	5 800	300
7	3 200	7 000	2 000
8	3 200	6 400	1 200
9	3 200	5 800	0

表 3 不同控制组合的风险控制代价

Table 3 Risk control cost of different control combinations

方案序号	万元		
	预防控制风险代价	紧急控制风险代价	总风险控制代价
1	0.00	149.85	149.85
2	24.00	107.89	131.89
3	48.00	47.95	95.95
4	20.00	131.87	151.87
5	44.00	89.91	133.91
6	68.00	17.98	85.98
7	40.00	119.88	159.88
8	64.00	71.93	135.93
9	88.00	0.00	88.00

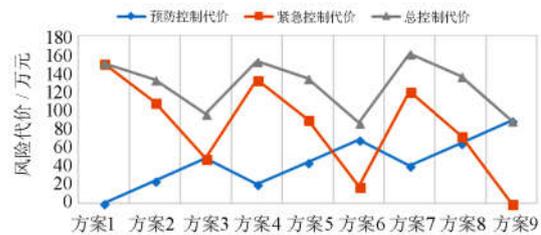


图 15 不同控制组合的风险控制代价

Fig. 15 Risk control cost of different control combinations

通过以上结果分析可知,为阻断连锁事故链进程,协调预防控制与紧急控制的方案 6 为风险代价最小的控制方案,而仅采用预防控制或者仅采用紧急控制并不是最佳方案。

6 结论

本文研究了高比例新能源与多直流场景下的连锁故障防控策略及实现方案。对保护控制装置动作评估指标与故障概率的定义关系进行优化,进一步充分考虑隐形故障概率,事故链搜索结果更能反映实际事故演化过程;提出的基于事故链信息的紧急控制思路能够以更小的控制代价阻断由多个均未配置紧急措施的相继扰动形成的连锁事故链,有效避免系统更大损失,进一步加强和完善了现有紧急控制体系对连锁故障事故链的阻断能力;预防控制与紧急控制的协调控制技术能够以最小的风险代价对新能源与多直流场景下的连锁故障进行防控。研究结论对实际高比例新能源与多直流电网安全运行控制具有一定理论意义。

参考文献

- [1] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [2] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solutions of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [3] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3756-3760.
LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak AC area[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756-3760.
- [4] 高凡, 吴军, 刘涤尘, 等. 特高压电网社会效益评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 12-17.
GAO Fan, WU Jun, LIU Dichen, et al. Research on the social benefit evaluation method of UHV power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 12-17.
- [5] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157.
WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [6] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [7] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [8] 石立宝, 史中英, 姚良忠, 等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 48-54.
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.
- [9] 余晓丹, 贾宏杰, 陈建华. 电力系统连锁故障预测初探[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 20-25.
YU Xiaodan, JIA Hongjie, CHEN Jianhua. A preliminary research on power system cascading contingency forecasting[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 20-25.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 宣晓华, 周野, 宋晓芳, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 101-109.
XUAN Xiaohua, ZHOU Ye, SONG Xiaofang, et al. A novel searching method of fault chains for power system cascading outages based on quantitative analysis of dynamic interaction between system and components[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 101-109.
- [13] 杨超平, 姚锐, 张爽, 等. 协调运行经济性与安全性的电力系统连锁故障风险控制方法[J]. 电工电能新技术,

- 2017, 36(12): 71-78.
 YANG Chaoping, YAO Rui, ZHANG Shuang, et al. Cascading outage risk mitigation method coordinating economy and security in power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12): 71-78.
- [14] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17.
 FU Rong, JIANG Guoping, WANG Baoyun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.
- [15] 于群, 张敏, 曹娜, 等. 基于模糊元胞自动机的电网连锁故障控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 90-95.
 YU Qun, ZHANG Min, CAO Na, et al. Grid cascading failure control based on fuzzy CA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 90-95.
- [16] 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.
- [17] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架——(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 1-10.
 XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.
- [18] 徐泰山, 薛禹胜. 暂态频率偏移可接受性的定量分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 7-10.
 XU Taishan, XUE Yusheng. Quantitative assessments of transient frequency deviation acceptability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 7-10.
- [19] 常海军, 侯玉强, 任先成, 等. 电网暂态相继失稳风险评估及协调阻断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 40-47.
 CHANG Haijun, HOU Yuqiang, REN Xiancheng, et al. Research on risk assessment and coordinated blocking of transient successive instability in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 40-47.
- [20] 李威, 薛禹胜, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(二)不同失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 7-10.
 LI Wei, XUE Yusheng, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability part II for cases with different unstable modes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 7-10.

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-25

作者简介:

王超(1988—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: wangchao8@sgepri.sgcc.com.cn

常海军(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: changhaijun@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)