

交直流电力信息物理系统连锁故障演化模型及风险评估

张晶晶,陈博进,吴佳瑜,齐先军,杨 熙

(合肥工业大学 安徽省新能源利用与节能省级实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:为了更准确地对交直流电力信息物理系统(CPPS)连锁故障进行仿真,提出考虑多时间尺度和控制措施时间特性的交直流CPPS连锁故障演化模型。首先,建立3种时间尺度过程下的模型,短时间尺度过程考虑直流换相失败引起的直流闭锁、暂态稳定判断及控制、交流线路严重过载、信息传输;长时间尺度过程考虑一般过载及其控制、重载线路跳闸;极长时间尺度过程考虑负荷波动。然后,考虑信息节点失效等因素选取初始故障集,若交流线路故障开断,判断直流线路是否换相失败引起直流闭锁;若直流线路故障闭锁,判断交流线路是否发生严重过载;若信息失效,判断线路状态信息是否上传;若应对一般过载,考虑控制措施的时间特性,制定交直流控制协调方案。最后,评估事故链风险。分别对线路开断信息上传失效、过载信息上传失效以及信息节点失效3种场景进行算例分析,并分析不同信息失效原因对事故链的影响,验证了基于多时间尺度的交直流CPPS连锁故障模型的有效性。

关键词:交直流电力信息物理系统;连锁故障;多时间尺度;信息上传失效;风险评估

中图分类号:TM 743

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202202010

0 引言

随着信息技术的发展以及直流线路的相继投运,电力信息物理系统(CPPS(Cyber-Physical Power System))的安全稳定问题日益凸显。越来越多的研究显示许多大停电事故与信息系统相关^[1],因此研究交直流CPPS连锁故障的影响十分必要。

目前针对交直流系统连锁故障和交流CPPS连锁故障研究较多。在交直流系统的连锁故障研究方面:文献[2]考虑紧急控制保护装置及直流系统概率动作特性,提出一种连锁故障仿真模型,但该模型较简单;文献[3]基于改进OPA模型,提出一种交直流系统连锁故障模型,但短路电压计算使用直流系统的等效导纳参数,结果有较大误差;文献[4]建立交直流系统事故链搜索模型,可快速筛选故障,但未考虑相应的暂态过程和控制措施,故障搜索过程的准确度有待提高。在交流CPPS连锁故障研究方面:文献[5]基于直流模型建立了电网及其通信网的交互作用模型;文献[6]建立考虑信息网受损的电网连锁故障模型,以研究信息网受损对电网连锁故障的影响;文献[7]基于直流潮流隐性故障模型,研究信息节点故障对电网连锁故障的影响;文献[8]定义了一种线路攻击代价指标,通过选取指标较低的线路进行攻击,通过分析研究得出针对低代价线路进行多

阶段线路攻击,可造成连锁故障停电事故,且代价较低;文献[9]采用病毒传播模型模拟连锁故障传播过程,通过优化流量分配策略减少其影响。以上文献通过不同的方法建立了信息物理系统连锁故障模型,分析通信网对电网连锁故障的影响以及对策,但未考虑直流线路故障,以及故障在交直流系统之间的相互传播,且未充分考虑信息物理系统连锁故障的动态过程和控制措施的时间特性问题。

现阶段鲜有研究交直流CPPS的连锁故障问题,为更准确地仿真交直流CPPS连锁故障,本文提出一种基于多时间尺度、考虑控制措施时间特性的交直流CPPS连锁故障演化模型。将交直流CPPS连锁故障中不同的物理现象和对策划分到不同的时间尺度过程,并建立相应的模型,研究信息节点失效或信息传输延时的对交直流CPPS连锁故障的影响,同时分析何种信息失效原因对连锁故障的影响最大,以期对CPPS连锁故障的防控提供指导。

1 交直流CPPS模型

CPPS包含电网和通信网,信息节点监测和控制电力节点,电力节点为信息节点提供电力。根据复杂网络理论,电网和通信网可分别抽象为图 $G_p=(V_p, E_p)$ 和 $G_c=(V_c, E_c)$ 。电网物理设备抽象为节点 V_p (含发电机、负荷、线路节点等),其中发电机节点上传发电机实时功角及电磁功率等信息,负荷节点上传负荷功率,线路节点上传交流线路潮流、开断信息、过载信息以及直流线路输送功率、逆变侧母线电压、闭锁信息等,支路集合抽象为边 E_p ; V_c 对应于 V_p 的数据传输与处理中心, E_c 为通信链路。 V_p 、 V_c 为部分一对一对应^[10],按一定规则生成与电网对应的

收稿日期:2021-06-26;修回日期:2021-12-16

在线出版日期:2022-02-16

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1808085ME142);高等学校学科创新引智计划资助项目(BP0719039)

Project supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province(1808085ME142) and the 111 Project(BP0719039)

通信网^[11-12],分为接入层、骨干层和核心层,从而建立 CPPS 模型。

2 基于多时间尺度的交直流 CPPS 连锁故障建模

2.1 交直流 CPPS 连锁故障的时间尺度划分

本文按照电力系统中的物理现象和相应的对策的时间尺度,将 CPPS 连锁故障过程分为短时间尺度、长时间尺度和极长时间尺度^[13]。CPPS 连锁故障的 3 种时间尺度如附录 A 图 A1 所示。短时间尺度过程考虑由直流换相失败引起的直流闭锁^[14]、暂态稳定判断及控制、交流线路严重过载、信息传输;长时间尺度过程考虑一般过载及其控制、重载线路跳闸;极长时间尺度过程考虑负荷波动。其中信息传输时间一般在毫秒级^[15],因此将其归入短时间尺度过程。

2.2 交直流 CPPS 连锁故障的短时间尺度过程建模

图 1 为连锁故障短时间尺度过程仿真流程图。短时间尺度过程包括:信息的上传和下达(下文简称为信息传输环节);判断系统是否失去暂态稳定性(若交流线路开断或直流线路闭锁则判断失去暂态稳定性)、直流线路是否闭锁(若直流换相失败超过时间阈值则直流线路闭锁,通过信息上传模块上传至调度中心,考虑上传是否失效)、交流线路是否严重过载(若严重过载则线路直接跳闸,跳闸信息通过信息上传模块上传至调度中心);系统失稳后,调度中心会采取紧急控制措施,包括直流线路闭锁时送受端切机切负荷、扩展等面积准则 EEAC (Extended

Equal Area Criterion)切机、同相直流线路闭锁后其他直流线路紧急功率提升/回降^[12]。

信息传输环节的建模过程如下:电网运行数据上传至通信网,调度中心通过通信网,根据所得电网运行情况制定相应的控制策略并下发至电网。因此,可定义通信信道类型 $G_T = \{D_{up}, D_{down}\}$, D_{up} 为上行通信信道,即信息上传所用通道, D_{down} 为下行通信信道,即信息下达所用通道。假定信息(线路是否开断及线路此时的潮流、变压器的开合等)只通过线路两端编号较大的节点上传至接入层,若该节点因特定原因失效,信息不能通过该节点上传,则调度中心不能获得电网实际运行情况。调度中心下达的断路器开/合闸控制指令、发电机调度指令和切机切负荷指令也只通过下行通信信道传输至线路两端编号较大的节点。

实际电网的线路潮流及开断信息通过接入层、骨干层最终上传至调度中心,若以上信息因为通信网堵塞造成传输延时,无法及时上传到调度中心,则调度中心所掌握的电网状态和实际电网状态不一致,制定的控制策略会产生偏差,致使电网收到的控制命令和实际状态不匹配,从而可能加剧连锁故障的进程。

信息传输过程中,信息失效主要由信息节点失效和传输延时引起。信息节点 j 的初始失效概率 p_{0j} (用于确定信息网初始故障集)考虑网络拓扑和信息占用率的影响,计算公式如下:

$$p_{0j} = \frac{k_{V_{cj}}}{N_c} + \frac{n_{V_{cj}}}{N_c} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1} k_{V_{ci}} \quad \sum_{i=1} n_{V_{ci}}$$

式中: $k_{V_{cj}}$ 为信息节点 j 的 V_{cj} 的度数; N_c 为通信网节点数量; $n_{V_{cj}}$ 为信息节点 j 的 V_{cj} 的数据包数量。

实际的通信网传输的数据包成千上万,信息传输所用的时间主要取决于等待上一个数据包传输完成的等待时间。用 T_a/T_{max} 表示失效概率随传输延时的变化, T_a 、 T_{max} 分别为通信网传输时间的平均值和最大值;用 T_i/T_{max} 表示信息节点 i 的状态, T_i 为信息节点 i 完成信息传输所需时间。信息节点 i 的信息上传失效概率 p_i ^[12] 为:

$$p_i = \begin{cases} 1 & V_{ci}^{flag} = 1 \\ \frac{T_a}{T_{max}} \frac{T_i}{T_{max}} & V_{ci}^{flag} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $V_{ci}^{flag} = 1$ 表示信息节点 i 失效, $V_{ci}^{flag} = 0$ 表示信息节点 i 未失效。若信息节点失效,则该节点的上传/下达通道失效。若有上传传输延时(暂不考虑下达过程传输延时引起的失效),则该节点的信息以一定概率失效。综上,建立信息传输环节模型,如图 2 所示。

参考天广输电工程中直流线路紧急功率提升/

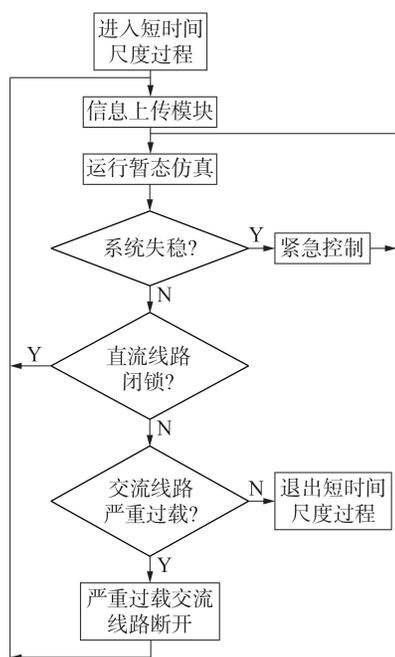


图 1 连锁故障短时间尺度过程仿真流程图
Fig.1 Short time-scale simulation flowchart of cascading failure

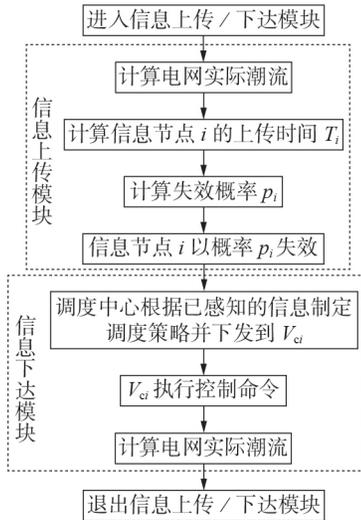


图2 信息传输环节模型

Fig.2 Model of information transmission link

回降,其主要步骤如下。

步骤1:步长取每次提升/回降百分比,按该定步长将直流紧急功率提升量离散化^[16]。设 P_1 为原先实际运行功率的 $\pm 25\%$,根据系统安全约束得到单回直流线路的最大实时可提升能力^[17-18],和 P_1 相比,将较小值作为最大实际可提升能力值 P_2 。

步骤2:根据直流线路功率提升该定步长。

步骤3:判断系统是否恢复稳定或直流线路功率是否达到 P_2 ,若两者满足其一,则停止功率提升/回降,否则转至步骤2。

调度中心通过演算,将相应的功率提升/回降信号下发给相应的直流线路。

2.3 交直流CPPS连锁故障的长时间尺度过程建模

长时间尺度过程考虑一般过载及其控制、重载线路跳闸,协调3种控制措施的流程见图附录A图A2。

若交流线路一般过载,本文结合直流线路功率提升/回降、发电机调度和灵敏度切机切负荷^[19]进行协调控制。其中,直流线路功率提升/回降结束判断条件为判断线路是否消除过载,若消除则终止功率调整,否则判断综合过载率 D 和上一次调整相比是否增大以及直流线路功率是否达到 P_2 ,两者满足其一则停止调整。其中 D 的计算公式如下:

$$D = \frac{\sum_{m \in \Omega} (F_m - F_{\max, m}^{\text{normal}})}{\sum_{m \in \Omega} (C_m - F_{\max, m}^{\text{normal}})} \quad (3)$$

式中: F_m 和 C_m 分别为线路 m 当前潮流值及其极限值; $F_{\max, m}^{\text{normal}}$ 为线路 m 潮流额定值; Ω 为过载线路集合。

当调度中心感知线路一般过载,通过演算得到相应控制量。设 T_{control} 、 T_{enable} 分别为发电机调度的控制时间和允许时间, D_k 为第 k 次计算得到的综合过

载率,优先采取直流调制,其次采取发电机调度。实施发电机调度的必要条件为 $T_{\text{control}} \leq T_{\text{enable}}$,若 $T_{\text{control}} > T_{\text{enable}}$,则用灵敏度切机切负荷。

重载线路跳闸的详细步骤为:计算每条线路开断概率关联性指标 p_{random} ,通过模糊聚类,将关联性指标最高的一类选为下级重载开断线路。其中 p_{random} 的计算公式如下:

$$p_{\text{random}} = \frac{(1-p_w)F_m}{C_m - F_{\max, m}^{\text{normal}}} + \frac{p_w C_m - F_{\max, m}^{\text{normal}}}{C_m - F_{\max, m}^{\text{normal}}} \quad F_{\max, m}^{\text{normal}} \leq F_m \leq C_m \quad (4)$$

式中: p_w 为线路潮流正常时,由线路自身随机故障因素导致线路开断的概率。

2.4 考虑多时间尺度的交直流CPPS连锁故障演化模型

图3为考虑多时间尺度的交直流CPPS连锁故障演化模型。

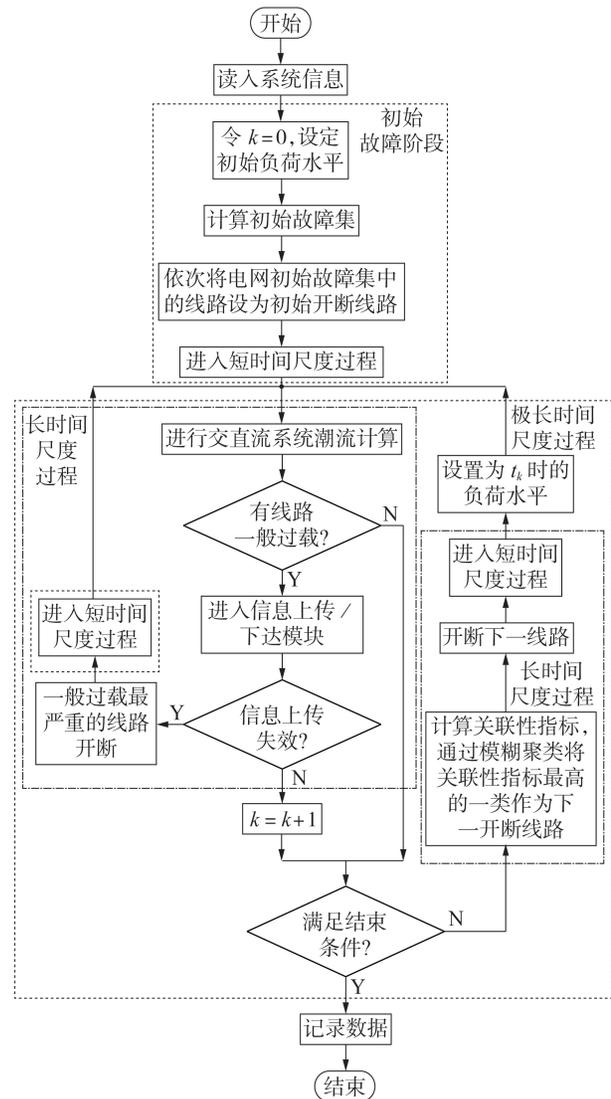


图3 交直流CPPS连锁故障演化模型

Fig.3 Cascading failure evolution model of AC/DC CPPS

具体步骤如下。

步骤 1: 设定初始负荷水平, 计算电网初始故障集^[19], 并计算通信网节点失效初始故障集, 设定初始故障线路及初始信息失效节点, 将第一个短时间尺度过程设定为初始故障阶段。设定迭代次数 $k=0$, 进入初始故障阶段; 从初始故障集选取一条线路开断, 进入短时间尺度过程, 依次判断系统是否失去暂态稳定性、直流线路是否闭锁、线路是否严重过载, 并进行相应的信息上传和控制。

步骤 2: 进入长时间尺度过程, 进行潮流计算, 若有一般过载线路, 则将过载信息经过信息上传模块上传至调度中心, 判断信息上传是否失效。若没有失效, 则调度中心下发命令进行交流线路一般过载协调控制, 转至步骤 3; 若失效, 则计算所有一般过载线路的过载率, 将过载率最高的线路跳闸, 进入短时间尺度过程, 然后转至步骤 2。

步骤 3: 判断是否达到结束条件, 若达到结束条件则退出运行, 否则执行下一步, 其中结束判据为系统解列为三部分或达到预定的演化深度。

步骤 4: 进入线路重载开断长时间尺度过程 (若有线路开断, 则进入短时间尺度过程);

步骤 5: 在极长时间尺度过程中更新负荷水平, 随后转至步骤 2。

3 风险计算

本文从控制代价的角度计算事故链的后果, 最终计算各预测路径的总平均故障风险。交直流 CPPS 的连锁故障在通信网和电网 2 个系统间交互传递, 故障路径 S_i 发生概率 $p(S_i)$ 为:

$$p(S_i) = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_n) = \prod_{i=1}^n p_{Z_i} \quad (5)$$

式中: $Z_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为线路断开、信息传输失效、信息节点失效等事件, n 为事件总数; p_{Z_i} 为事件 Z_i 发生的概率。

计算故障路径引起的代价 $C^{Sev}(S_i)$ 为:

$$C^{Sev}(S_i) = M_1 V_{G1} + M_2 V_{G2} + M_3 V_L + M_4 V_{DC} \quad (6)$$

式中: V_{G1} 、 V_{G2} 、 V_L 和 V_{DC} 分别为发电机调度控制量、切机量、切负荷量和直流紧急功率提升 / 回降量, $M_1 - M_4$ 为相应控制的控制代价。

预测路径的总平均故障风险 $R(S_{all})$ 和代价 $C^{Sev}(S_{all})$ 分别为:

$$R(S_{all}) = \sum_{i=1}^q R(S_i) / q = \sum_{i=1}^q p(S_i) C^{Sev}(S_i) / q \quad (7)$$

$$C^{Sev}(S_{all}) = \sum_{i=1}^q C^{Sev}(S_i) / q \quad (8)$$

式中: q 为预测路径数; $R(S_i)$ 为故障路径 S_i 的风险。

4 算例分析

附录 A 图 A3 为由 IEEE 39 节点系统改造的交直流混联系统, 建立其通信网结构如附录 A 图 A4 所示。直流线路 DC_1、DC_2 的额定功率分别为 480、400 MW, 附录 A 表 A1 为其直流功率提升 / 回降量及速率。关联性指标模糊聚类数为 3, 模糊聚类的加权指数为 2, 发电机调整速率为每分钟 10%; 极长时间尺度过程的周期取 1 h; 演化深度取 4, $M_1 - M_4$ 分别取 15、200、700、10 元 / MW^[20]。通信网节点 V_{c14} 、 V_{c13} 、 V_{c7} 分别发送电网线路 L_8 和 L_{18} 、 L_{17} 、 L_{11} 的信息, 通信网节点 V_{c19} 、 V_{c27} 、 V_{c3} 分别发送电网线路 L_{22} 、直流线路 DC_1、直流线路 DC_2 的信息。本文通过 PSASP 软件结合 MATLAB 进行仿真。

4.1 连锁故障演化过程分析

以新的重载开断将事故链分为不同阶段。表 1 展示了 L_{27} 为初始故障的事故链演化过程 (对应附录 A 表 A2), 初始阶段通信网节点 V_{c14} 因传输延时导致信息上传失效, L_{27} 开断信息上传未受到影响, 因此 V_{c14} 信息上传失效对连锁故障没有影响。后续, 通信网节点 V_{c13} 、 V_{c12} 、 V_{c7} 、 V_{c29} 因传输延时导致上传失效均对事故链的走向无影响, 路径 1 中因传输延时导致信息节点失效对事故链无影响。

表 1 事故链演化过程

Table 1 Evolution process of accident chain

阶段	发展过程	措施	时间尺度
初始阶段	设置 $k=0$ 时的负荷水平		
	L_{27} 开断		
	V_{c14} 上传失效		短时间尺度
	L_{29} 严重过载开断		短时间尺度
	V_{c13} 上传失效		短时间尺度
阶段 1	解列为两部分	功率再平衡	长时间尺度
	L_{18} 一般过载	DC_1 传输功率调整为 24 MW	长时间尺度
	L_{18} 重载开断		长时间尺度
	V_{c12} 上传失效		短时间尺度
	更新负荷水平		极长时间尺度
阶段 2	暂态失稳	G_2 切除 20%	短时间尺度
	L_{27} 严重过载开断		短时间尺度
	V_{c7} 上传失效		短时间尺度
	L_{12} 、 L_{16} 、 L_{22} 、 L_{30} 一般过载	切机切负荷	长时间尺度
	L_{22} 重载开断		长时间尺度
阶段 2	V_{c29} 上传失效		短时间尺度
	更新负荷水平		极长时间尺度
	解列为三部分	功率再平衡	长时间尺度

由表 1 可知, 阶段 1 的短时间尺度过程相比初始阶段的短时间尺度过程明显增多, 这是因为事故链越往后发展, 系统的网架结构越脆弱。阶段 2 连锁

故障很快就达到结束条件。随着 L_{27} 、 L_{29} 、 L_{18} 依次开断,系统稳定性变得越来越差,系统出现暂态失稳,发电机 G_2 切除20%,电网系统恢复稳定, L_7 严重过载引起开断,加剧系统不稳定,最终在阶段2系统解列为三部分,达到结束条件。路径1的事故链可以清楚表明线路故障停运、信息失效、保护动作、控制措施实施等物理现象和对策的时间尺度过程,便于分析系统连锁故障的发展,表明了基于多时间尺度的连锁故障演化模型的优点。

4.2 连锁故障路径分析

4.2.1 交流线路开断信息上传失效的影响

附录A表A2—A8分别为交直流CPPS的事故链路径1—7的演化过程。路径1和路径3对比情况如表2所示。可见路径3的安稳措施动作控制代价较高,导致路径3的风险高于路径1。

表2 路径1和路径3对比

Table 2 Comparison between Path 1 and Path 3

路径	事故链	风险
1	L_{22} 断开,系统功率再平衡	低
3(L_{22} 开断信息上传失效)	L_{22} 断开,通信网节点 V_{c19} 因传输延时而暂时上传失效,导致调度中心不能接收到 L_{22} 开断信息,实际电网已解列成三部分,安稳措施动作进行切机切负荷	高

4.2.2 直流线路闭锁信息上传失效的影响

路径6和路径7对比情况如表3所示。可见路径7的直流线路闭锁信息上传失效(概率较低),控制代价与路径6相同,风险较路径6低。

表3 路径6和路径7对比

Table 3 Comparison between Path 6 and Path 7

路径	事故链	风险
6(直流线路闭锁信息上传成功)	L_{17} 被切除,DC_2闭锁,系统失稳,切机200 MW消除失稳	高
7(直流线路闭锁信息上传失效)	L_{17} 被切除后,DC_2闭锁,调度中心不能接收到此闭锁信息,但调度中心仍可接收到发电机信息,判别系统失稳,切机200 MW消除失稳	低

4.2.3 过载信息上传失效的影响

路径1和路径4对比情况如表4所示。可见路径4的 L_{18} 过载信息上传失效,发生概率较路径1高,风险也较高。

表4 路径1和路径4对比

Table 4 Comparison between Path 1 and Path 4

路径	事故链	风险
1	L_{18} 一般过载,DC_1提升24 MW消除过载,模糊聚类选取下级重载 L_{18} 开断,开断概率为0.9725	低
4(L_{18} 一般过载信息上传失效)	L_{18} 一般过载,调度中心未感知到,无措施,下一阶段 L_{18} 开断,开断概率为1	高

4.2.4 信息节点失效的影响

由附录A表A6可知,路径5(信息节点失效)的节点 V_{c27} 失效,接收不到针对 L_{18} 一般过载调度中心的控制命令,此时安稳装置动作切机切负荷20 MW。阶段2中 L_{22} 断开需切除负荷 LD_{27} ,由于对应节点 V_{c27} 失效,无法控制,最终安稳装置动作切除DC_1。路径5的代价因安稳装置动作大幅增加,由于信息节点 V_{c27} 失效概率极低,最终路径5的风险远低于其他无信息节点失效的路径风险。

4.3 风险评估

表5展示了CPPS的连锁故障平均故障风险和代价,表中的开断信息上传失效包括交流线路和直流线路闭锁信息上传失效,对系统的影响相对较小。信息节点失效的事故链平均故障代价大于传输延时的事故链,而平均故障风险却远小于传输延时的事故链,这与4.2节的分析相契合。本文中传输延时只考虑上传失效,不考虑下达失效;信息节点失效是长时间的,可能会导致开断信息上传失效、一般过载信息上传失效多个事件同时发生,而且可能导致调度中心控制命令下达失效,而传输延时是暂时的,信息节点失效的事故链平均故障代价较高。传输延时发生的概率远大于信息节点失效概率,因此信息节点失效的事故链平均故障风险较低。从表5可知:传输延时引起的一般过载信息上传失效的事故链平均风险最高,电网应主要预防这类失效;信息节点失效会造成事故链的控制代价过大,要确保信息节点正常,避免造成过大的经济损失。

表5 CPPS连锁故障平均故障风险和代价

Table 5 Average failure risk and cost of cascading failure for CPPS

		单位:元	
失效场景	原因	平均故障风险	平均故障代价
失效信息对事故链无影响	由传输延时引起	8893	3171656
	由信息节点失效引起	956	3171656
开断信息上传失效	由传输延时引起	8869	3395396
	由信息节点失效引起	1354	3812899
一般过载信息上传失效	由传输延时引起	9233	3457296
	由信息节点失效引起	1478	4256341

5 结论

目前CPPS连锁故障仅针对纯交流系统进行分析,本文建立交直流CPPS,提出一种基于多时间尺度的交直流CPPS连锁故障演化模型。该模型考虑暂态过程的动态特性,包含CPPS在不同时间尺度下的物理现象和控制措施,较真实地反映了事故链发展过程。基于IEEE 39节点系统的算例分析得到如下结论。

1)交直流CPPS连锁故障演化模型可用来分析交直流CPPS连锁故障各阶段的物理现象和控制对策以及所对应的各时间尺度过程。

2)信息有无失效对各事故链的风险和控制代价影响有差异,若开断信息上传失效,则调度中心不能感知解列,从而造成控制代价过高;若一般过载信息上传失效,事故链发生的概率和风险增大;若信息节点失效,可能导致多类信息上传失效,控制代价过高。

3)不同的信息失效原因对事故链的平均故障风险和代价的影响不同:传输延时引起的一般过载信息上传失效的事故链平均风险最高,信息节点失效造成事故链的控制代价过大。因此不能忽略传输延时的影响,采取相应的控制时需加以考虑。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

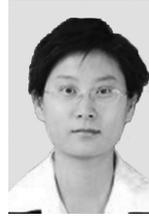
- [1] 陈柯任,文福拴,赵俊华,等.考虑物理-信息虚拟连接的电力信息物理融合系统的脆弱性评估[J].电力自动化设备,2017,37(12):67-72,79.
CHEN Keren, WEN Fushuan, ZHAO Junhua, et al. Vulnerability assessment of cyber-physical power system considering virtual cyber-physical connections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 67-72, 79.
- [2] TU J, XIN H, WANG Z, et al. On self-organized criticality of the East China AC-DC power system: the role of DC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3204-3214.
- [3] ZHONG Y, ZHANG X, HUANG S, et al. Cascading failure model of AC-DC system and blackout mechanism analysis [C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [4] 李文博,朱元振,刘玉田.交直流混联系统连锁故障搜索模型及故障关联分析[J].电力系统自动化,2018,42(22):59-72.
LI Wenbo, ZHU Yuanzhen, LIU Yutian. Search model and correlation analysis for cascading failures in AC/DC hybrid power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 59-72.
- [5] 曹一家,张宇栋,包哲静.电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J].电力自动化设备,2013,33(1):7-11.
CAO Yijia, ZHANG Yudong, BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 7-11.
- [6] 张殷,肖先勇,陈晶,等.信息网受损对电网过载主导型连锁故障的影响[J].电力系统自动化,2017,41(13):14-21.
ZHANG Yin, XIAO Xianyong, CHEN Jing, et al. Impact of information network damage on overload-based cascading failures of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 14-21.
- [7] 张宇栋,曹一家,包哲静.输电线路开断状态信息传输失真对连锁故障的影响[J].电力系统自动化,2012,36(24):4-9.
ZHANG Yudong, CAO Yijia, BAO Zhejing. Impact of transmission distortion of line-outage-state information on cascading failures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(24): 4-9.
- [8] 蔡晔,刘放,曹一家,等.电力信息物理系统低代价多阶段高危攻击策略研究[J].电力系统自动化,2021,45(20):1-8.
CAI Ye, LIU Fang, CAO Yijia, et al. Research on low-cost multi-stage high-risk attack strategy for power cyber-physical system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 1-8.
- [9] RUI L, WANG X, QIU X. Analysis of cascade fault optimization based on regional fault and traffic reallocation in complex networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 24818-24828.
- [10] 冀星冲,王波,刘涤尘,等.相依网络理论及其在电力信息-物理系统结构脆弱性分析中的应用综述[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4521-4532.
JI Xingpei, WANG Bo, LIU Dichen, et al. Review on interdependent networks theory and its applications in the structural vulnerability analysis of electrical cyber physical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4521-4532.
- [11] 王涛,孙聪,顾雪平,等.电力通信耦合网络建模及其脆弱性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(12):3556-3567.
WANG Tao, SUN Cong, GU Xueping, et al. Modeling and vulnerability analysis of electric power communication coupled network[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3556-3567.
- [12] 尉静慧.考虑台风和信息因素的电力系统连锁故障建模分析[D].合肥:合肥工业大学,2020.
WEI Jinghui. Modeling analysis of power system cascading failure considering typhoon and communication factors[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [13] 张晶晶,陈博进,尉静慧,等.一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(4):125-132.
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.
- [14] 李伟,肖湘宁,郭琦.直流换相失败期间阀换相过程微观分析方法[J].电力自动化设备,2017,37(3):115-119,183.
LI Wei, XIAO Xiangning, GUO Qi. Micro-analysis of valve commutation process during DC commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 115-119, 183.
- [15] 韩宇奇,何宜倩,楼凤丹,等.基于SDN的动态优化路由策略在信息物理融合电力系统连锁故障中的研究与应用[J].电网技术,2018,42(8):2620-2629.
HAN Yuqi, HE Yiqian, LOU Fengdan, et al. Analysis and application of SDN based dynamic optimal route strategy for cyber layer in cascading failures of cyber-physical power system [J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2620-2629.
- [16] 屠竞哲,甘德强,杨莉,等.基于稳定约束最优潮流方法的“三华”特高压互联电网交直流相互影响分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(19):54-60.
TU Jingzhe, GAN Deqiang, YANG Li, et al. North China-Central China-East China UHV interconnected power grid AC/DC interaction analysis based on stability constrained optimal power flow method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 54-60.
- [17] 许涛,吴雪莲,李兆伟,等.改善系统频率稳定性的多直流功率紧急支援协调控制策略[J].电力系统自动化,2018,42(22):69-77,143.
XU Tao, WU Xuelian, LI Zhaowei, et al. Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 69-77, 143.
- [18] 杨瑞,和敬涵,许寅,等.考虑安控措施的交直流电力系统动态等值边界确定方法[J].电力自动化设备,2020,40(4):56-62.
YANG Rui, HE Jinghan, XU Yin, et al. Determination method of dynamic equivalent boundary for AC-DC power system con-

sidering security control actions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 56-62.

- [19] 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.
- [20] 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): 5902-5912. DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model[J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5902-5912.

作者简介:



张晶晶

张晶晶(1977—),女,副教授,博士,研究方向为电力系统规划及可靠性、电力系统继电保护(E-mail: dragonzjj@126.com);

陈博进(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统连锁故障的建模和控制(E-mail: 1920074608@qq.com)。

(编辑 李玮)

Cascading failure evolution model and risk assessment of AC / DC CPPS

ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WU Jiayu, QI Xianjun, YANG Xi

(Anhui Provincial Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to simulate the cascading failure of AC / DC CPPS (Cyber-Physical Power System) more accurately, the cascading failure evolution model of AC / DC CPPS considering multiple time-scales and time characteristic of control measures is proposed. Firstly, the models under three time-scale processes are established. DC blocking caused by DC commutation failure, transient stability judgment and control, severe overload of AC line and information transmission are considered in the short time-scale process, general overload and its control, heavy-duty line tripping are considered in the long time-scale process, and load fluctuation is considered in the extreme long time-scale process. Secondly, the initial fault set considering the information node failure and other factors is selected. If AC line fault is breaking, it is necessary to judge whether DC line is blocked due to commutation failure. If DC line is blocking, it is necessary to judge whether AC line is severe overloaded. If the information is failure, it is necessary to judge whether the line state information is uploaded. If AC line is generally overloaded, the AC / DC control coordination schemes are formulated considering the time characteristic of control measures. Finally, the risk assessment of accident chain is performed. The case analysis is carried out under three cases of line breaking / overload information upload failure and information node failure, and the influence of different information failure reasons on the accident chain is analyzed, so that the effectiveness of the cascading failure model of AC / DC CPPS based on multiple time-scales is verified.

Key words: AC / DC CPPS; cascading failure; multiple time-scales; information upload failure; risk assessment

附录 A

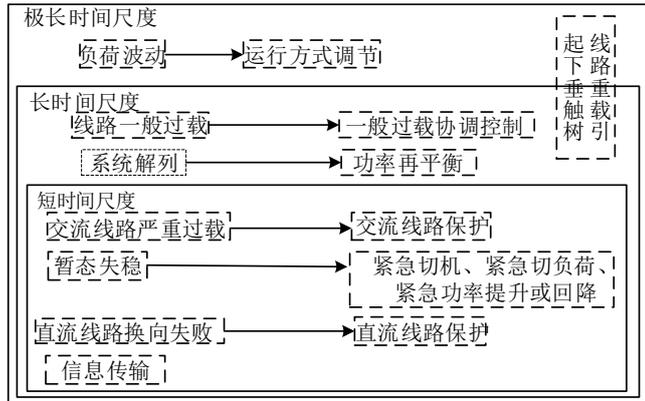


图 A1 交直流系统连锁故障不同现象和对策的时间尺度

Fig.A1 Time scales of different phenomena and countermeasures of cascading faults in AC/DC system

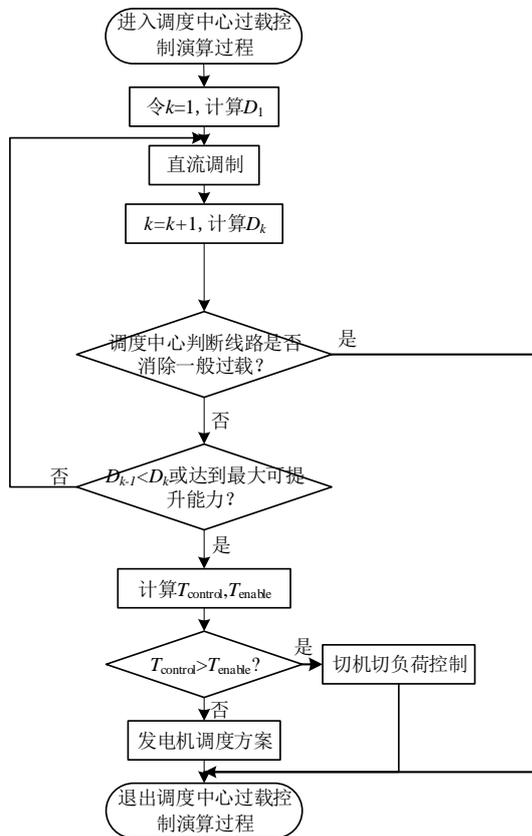


图 A2 交流线路一般过载协调控制

Fig.A2 Coordinated control of AC line general overload

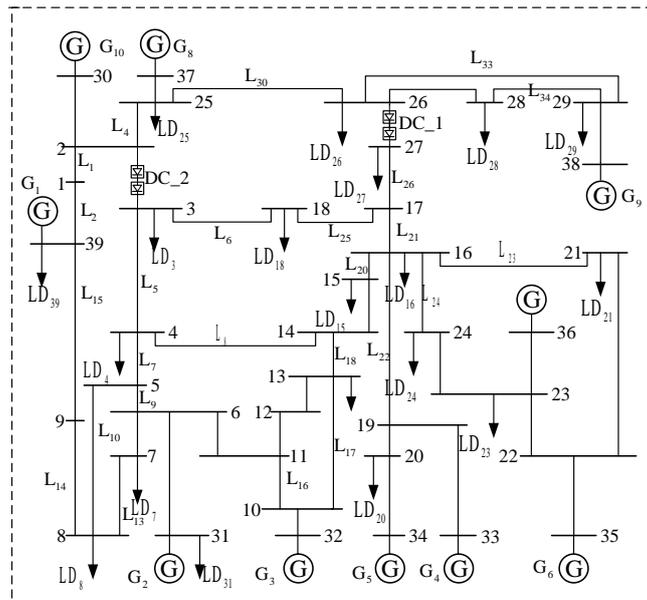


图 A3 加入直线路径的 IEEE 39 节点系统图
Fig.A3 IEEE 39-bus system diagram with DC lines

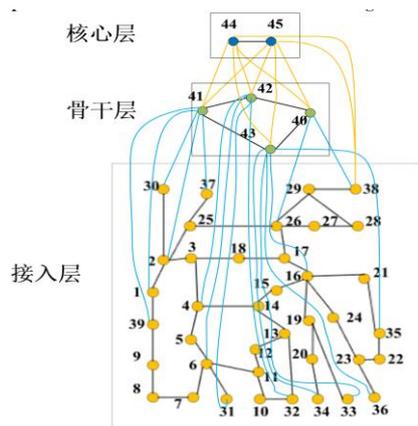


图 A4 通信网结构图

Fig.A4 Communication network structure diagram

表 A1 直流线路 DC_1/DC_2 提升/回降量及速率
Table A1 Power change and change rate of DC_1/DC_2

档别	功率提升、 降低量/MW	功率提升、 降低速率/s
1	24、20	27、23
2	48、40	40、34
3	72、60	53、45
4	96、80	66、56
5	120、100	80、67

表 A2 L₂₇ 为初始故障时传输延时导致信息上传失效

Table A2 With L₂₇ being initial failure information transmission delay caused by information upload failure

路径 1: 失效信息对事故链无影响 (传输延时)										
故障环节	初始阶段				阶段 1				阶段 2	
事故链	L ₂₇	V _{c14}	L ₂₉	V _{c13}	L ₁₈	V _{c12}	L ₇	V _{c7}	L ₂₂	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		解列为两部分; L ₁₈ 一般过载		暂态失稳		L ₁₂ 、L ₁₆ 、L ₂₂ 、L ₃₀ 一般过载		解列为三部分	
调度中心下发的控制措施	无		功率再平衡; V _{DC} 24MW		V _{G2} 292.2MW		V _L 864.4394 MW, V _{G2} 864.4394 MW		功率再平衡; 切除负荷 18、15、3、27、16、24	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上									

表 A3 L₂₇ 为初始故障时 V_{c6} 失效导致信息上传失效

Table A3 With L₂₇ being initial failure information upload failure caused by V_{c6} failure

路径 2: 失效信息对事故链无影响 (信息节点 V _{c6} 失效)											
故障环节	初始阶段					阶段 1				阶段 2	
事故链	V _{c6}	L ₂₇	V _{c14}	L ₂₉	V _{c13}	L ₁₈	V _{c12}	L ₇	V _{c7}	L ₂₂	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载			解列为两部分; L ₁₈ 一般过载		暂态失稳		L ₁₂ 、L ₁₆ 、L ₂₂ 、L ₃₀ 一般过载		解列为三部分	
调度中心下发的控制措施	无			功率再平衡; V _{DC} 24MW		V _{G2} 292.2MW		V _L 864.4394 MW, V _{G2} 864.4394 MW		功率再平衡; 切除负荷 18、15、3、27、16、24	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载			无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上										

表 A4 L₂₇ 为初始故障时由传输延时引起的重载开断信息上传失效

Table A4 With L₂₇ being initial failure overload interruption information uploading failure caused by information transmission delay

路径 3: 由传输延时引起的重载开断信息上传失效										
故障环节	初始阶段				阶段 1				阶段 2	
事故链	L ₂₇	V _{c14}	L ₂₉	V _{c13}	L ₁₈	V _{c12}	L ₇	V _{c7}	L ₂₂	V _{c19}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		解列为两部分; L ₁₈ 一般过载		暂态失稳		L ₁₂ 、L ₁₆ 、L ₂₂ 、L ₃₀ 一般过载		无线路过载	
调度中心下发的控制措施	无		功率再平衡; V _{DC} 24MW		V _{G2} 292.2MW		V _L 864.4394MW, V _{G2} 864.4394MW		无	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上								解列为三部分, 安稳措施动作	

表 A5 L₂₇ 为初始故障时由传输延时引起的一般过载信息上传失效

Table A5 With L₂₇ being initial failure general overload information uploading failure caused by information transmission delay

路径 4: 由传输延时引起的一般过载信息上传失效										
故障环节	初始阶段				阶段 1				阶段 2	
事故链	L ₂₇	V _{c13}	L ₂₉	V _{c14}	L ₁₈	V _{c12}	L ₇	V _{c7}	L ₂₂	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		解列为两部分; L ₁₈ 一般过载		暂态失稳		潮流计算不成功; L ₁₂ 、 L ₁₆ 、L ₂₂ 、L ₃₀ 一般过载		解列为三部分	
调度中心下发的控制措施	无		功率再平衡		V _{G2} 292.2MW		V _L 1062.4394MW, V _{G2} 1062.4394MW		功率再平衡; 切除负荷 18、15、3、 27、16、24	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载		无线路过载		无线路过载		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上		L ₁₈ 一般过载		同上					

表 A6 L₂₇ 为初始故障时 V_{c27} 失效导致信息上传失效

Table A6 With L₂₇ being initial failure information upload failure caused by V_{c27} failure

路径 5: 信息节点失效											
故障环节	初始阶段					阶段 1				阶段 2	
事故链	V _{c27}	L ₂₇	V _{c14}	L ₂₉	V _{c12}	L ₁₈	V _{c4}	L ₇	V _{c7}	L ₂₂	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载			解列为两部分: L ₁₈ 一般过载		暂态失稳		潮流计算不成功; L ₁₂ 、L ₁₆ 、L ₂₂ 、L ₃₀ 一般过载		无线路过载	
调度中心下发的控制措施	无			功率再平衡		V _{G2} 292.2MW		V _L 1038.43MW, V _{G2} 1038.43MW		功率再平衡; 切除负荷 18、15、 3、16、24	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	L ₂₉ 严重过载			无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上			安稳装置动作, V _L 20MW, V _{G2} 20MW		同上				安稳装置动作闭 锁直流线路 DC_1	

表 A7 L₂₀ 为初始故障时传输延时导致信息上传失效

Table A7 With L₂₀ being initial failure information transmission delay caused by information upload failure

路径 6: 失效信息对事故链无影响 (传输延时)										
故障环节	初始阶段				阶段 1				阶段 2	
事故链	L ₂₀	V _{c14}	L ₂₅	V _{c13}	L ₁₇	V _{c12}	L ₁₆	V _{c7}	L ₁	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₅ 、L ₅ 、L ₆ 一般过载		L ₁₇ 、L ₁₈ 、L ₂₂ 、L ₇ 一般过载		DC_2 因逆变侧母线电压低于 阈值 1s 而换相失败, 相应 保护动作将其闭锁, 暂态 失稳		系统解列为两 部分; L ₂₂ 一般 过载		系统失稳, 解 列为三部分	
调度中心下发的控制措施	V _{DC} 180MW		V _{G1} 1106MW, V _L 350MW, V _{G2} 350MW		紧急控制动作, V _{G2} 200MW		功率再平衡; V _{G1} 100MW		V _{DC} 240MW, V _L 965MW	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	无线路过载		无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上									

表 A8 L₂₀ 为初始故障时直流线路闭锁信息上传失效

Table A8 With L₂₀ being initial failure invalid uploading of DC line blocking information

路径 7: 由传输延时引起的直流线路闭锁信息上传失效										
故障环节	初始阶段				阶段 1				阶段 2	
事故链	L ₂₀	V _{c14}	L ₂₅	V _{c13}	L ₁₇	V _{c3}	L ₁₆	V _{c7}	L ₁	V _{c29}
下达控制命令之前调度中心感受到的电网状态	L ₂₅ 、L ₅ 、L ₆ 一般过载		L ₁₇ 、L ₁₈ 、L ₂₂ 、L ₇ 一般过载		DC_2 因逆变侧母线电压低于阈值 1s 而换相失败, 相应保护动作将其闭锁, 暂态失稳		系统解列为两部分; L ₂₂ 一般过载		系统失稳, 解列为三部分	
调度中心下发的控制措施	V _{DC} 180MW		V _{G1} 1106MW, V _L 350MW, V _{G2} 350MW		无		功率再平衡; V _{G1} 100MW		V _{DC} 240MW, V _L 965MW	
下达控制命令之后调度中心感受到的电网状态	无线路过载		无线路过载		无线路过载 暂态稳定		无线路过载		无线路过载	
实际电网运行状况	同上				紧急控制 V _{G2} 200MW		同上			