

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220667

基于网络依存关系的 CPPS 连锁故障分析及风险评估

张晶晶, 吴佳瑜, 齐先军, 杨熙, 孙磊

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

摘要: 信息系统的融合给电网安全运行带来了新的风险, 因此有必要研究电力信息物理系统(cyber-physical power system, CPPS)连锁故障的产生及传播机理。首先建立 CPPS 部分相互依存模型, 采用老化因素、潮流、隐性故障、偶然因素构建电网风险元, 采用信息占用率、拓扑结构、网络攻击、节点负荷以及依存关系构建信息网风险元, 从而将风险元理论应用于 CPPS 连锁故障预测过程。其次提出一种同时考虑两网失负荷率的风险计算方法, 可以识别骨干层与接入层的关键节点。最后分析信息节点自身故障和网络攻击引起的信息节点失效对连锁故障的不同影响。算例分析表明: 依存关系会促进故障在两网传播, 增大系统的风险; 对 CPPS 进行整体分析能较全面地评估连锁故障风险, 识别关键信息节点; 同时遭受网络攻击与信息节点自身故障的 CPPS 的平均风险最高, 需采取措施提高其可靠性。

关键词: 电力信息物理系统; 相互依存; 风险元; 连锁故障; 风险评估

Cascading failure analysis and risk assessment of CPPS based on network dependency

ZHANG Jingjing, WU Jiayu, QI Xianjun, YANG Xi, SUN Lei

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

Abstract: The integration of an information network brings new risks to the safe operation of the power grid, so study of the generation and propagation mechanism of CPPS cascading failure is a matter of importance. First, a CPPS partial interdependence model is established, grid risk elements are constructed based on ageing factors, load flow, hidden failure and chance factors. Then information network risk elements are constructed based on information occupancy, topology, network attacks, node loads and dependencies, and risk element theory is applied to the CPPS cascading failure prediction process. Second, a risk calculation method considering the load loss rate of the two networks is proposed to identify the key nodes of the backbone layer and the access layer. Different effects of information node failure by information nodes and network attacks are analyzed. The analysis shows that the dependency relationship will promote the propagation of faults in two networks and increase the risks; the risk calculation method can comprehensively assess cascading failure risk and identify key information nodes; when a network attack is combined with the node's own failure, the average risk of CPPS is the highest, measures should be taken to improve the reliability of CPPS.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Anhui Province (No. 1808085ME142).

Key words: cyber-physical power system; interdependence; risk element; cascading failure; risk assessment

0 引言

CPPS 可以更全面地采集电力系统的信息, 分析其状态特征, 然而大量信息技术及智能设备的

投入使 CPPS 存在很多安全隐患^[1-6]。

以往针对 CPPS 的研究大多基于复杂网络理论, 研究结果过于乐观, 可能导致工作人员在电网运行中做出错误判断。2010年, 文献[7]首次提出相互依存的网络概念及其脆弱性分析框架: 根据电网和信息网拓扑建立依存关系, 对两网进行一体化分析, 研究相互依存网络结构特性对耦合系统脆弱性的影响, 重新审视复杂网络理论在 CPPS 中的应用。

基金项目: 安徽省自然科学基金项目资助(1808085ME142); 高等学校学科创新引智计划资助(BP0719039); 国家自然科学基金资助(51907043)

文献[8-10]研究侧重于相互依存网络理论,该理论应用于 CPPS 建模对研究 CPPS 连锁故障有重要意义。

文献[11]根据初始线路停运及后续线路停运的风险元建立线路停运风险传递模型,进而建立连锁故障风险传递模型。文献[12]运用模糊算法建立风电风险元传递算法。文献[13]考虑信息风险元的不确定性,寻找影响调度的核心信息风险元。上述风险元传递理论的研究主要集中于电网或信息网,针对两网相互依存的 CPPS,风险元需综合考虑。

CPPS 的风险评估目前仍集中于电网或信息网单个网络。文献[14]使用电网的故障发生概率与切负荷的乘积表征,文献[15-16]以电网负荷损失评价网络攻击的影响;文献[17]通过信息网的连通、监视和控制 3 个脆弱性指标进行评估,文献[18]提出连通性、网络效率等指标评估信息网的可靠性。以上风险评估均未将 CPPS 视为一个整体,不够全面。

综上,本文建立 CPPS 部分相互依存的模型,考虑电网线路与信息网节点的过负荷,根据老化、潮流、隐性故障、网络拓扑结构、网络攻击、节点负荷等因素构建 CPPS 风险元,网络攻击与信息节点自身故障相结合,研究故障在两网之间的交互传播机理;综合考虑电网与信息网的失负荷率,提出一种新的风险计算方法,为相互依存网络连锁故障的防控提供理论指导。

1 相依网络建模

1.1 信息网建模

应用复杂网络理论,分别以图 $G_p = (V_p, E_p)$ 和 $G_c = (V_c, E_c)$ 来表征电网和信息网, V_p 为电网物理设备, V_{pi} 为第 i 个电网物理设备, V_c 为信息网设备, V_{ci} 为第 i 个信息网设备, E_p 为线路, E_c 为通信链路;信息节点 V_c 负责电力节点 V_p 的数据传输与处理, V_p 为 V_c 提供电力支持^[19]。信息网由核心层、骨干层和接入层构成。核心层配有主调度中心和备用调度中心,通过高端路由设备,保证不间断提供能量,以确保电网经济调度和安全运行的可靠性;骨干层负责区域调度,配有备用电源,其节点数与电网的分区数有关,区域内接入层信息的汇聚、转发都依赖于该区域的骨干层,骨干层节点环形互联;接入层负责采集信息、传输命令,其中与变电站和发电厂相连的节点直接与骨干层相连,部分重要发电厂节点还与核心层连接,由此按一定规则生成信息网^[20]。

1.2 相依网络依存关系

网络间依存方式分为“一一对应”、“部分相互依存”、“一对多”、“多对多”、多重依存和考虑节点

异质性的 CPPS 相依网络模型,前 4 种模型主要研究网络拓扑,后两种模型部分或全面地考虑了网间的节点异质性^[21]。

骨干层和核心层节点在信息网中至关重要,因此均配有备用电源以保证充足的能量供应,可为“自治节点”,与电力节点之间不存在直接的依存关系。若使本文定义的节点有效需满足下述条件:

1) 除自治节点外,网络中其他节点必须得到其依存节点的支持,否则视为失效;

2) 当电网解列为多个子集时,若子集内至少存在一个负荷和一个发电机,则该子集能继续工作,电力节点仍然有效;

3) 当信息网解列为多个子集时,若子集内接入层节点仍能通过通信链路将信息上传至核心层,则该子集能继续工作,信息节点仍然有效。

1.3 CPPS 建模

CPPS 建模包含信息网、电网及耦合层,信息网由接入层、骨干层和核心层组成,耦合层负责连接电网与信息网。电力节点与信息网接入层节点一一对应,接入层节点需要对应电力节点提供能量,并控制对应电力节点,两者相互依存,而骨干层、核心层节点为自治节点, CPPS 属于“部分相互依存”的网络模型^[20]。

2 连锁故障中风险元传递过程

2.1 连锁故障的风险元信息

CPPS 元件的相继故障将最终导致连锁故障的发生,而风险元理论有利于找出受风险因素影响较大的风险传递路径。文献[20]建立风险元传递函数分析引起连锁故障的风险元,并未考虑信息网与电网的依存关系、电力节点孤立、信息节点过负荷失效等因素。因此,考虑上述 3 种因素,可以更全面地预测 CPPS 连锁故障。CPPS 连锁故障的风险元信息如表 1 所示,度量方法采用可能性度量。

表 1 CPPS 连锁故障的风险元信息

Table 1 Risk element information for cascading failures of CPPS

风险元传递过程	电网	信息网	CPPS 连锁故障
风险元	线路老化、初始潮流、潮流转移、隐性故障、偶然因素、 V_{pi} 依存 V_{ci}	信息占用率、拓扑结构、网络攻击、节点负荷、 V_{ci} 依存 V_{pi}	电网故障、信息网故障
目标对象	初始线路故障、后续线路故障、电力节点失效	初始信息节点失效、后续信息节点失效	连锁故障
传递结构	与行	与行	串行

2.2 元件故障概率的度量

2.2.1 电网线路故障概率

设 N_p 为电网线路数, l_k 为线路 k 的单位长度, l_i 为线路的单位长度。当自然环境相同时, 线路老化因素仅与长度有关, 因此, 与老化因素 x_1 有关的线路故障概率 $p_k^g(x_1)$ [22] 可表示为

$$p_k^g(x_1) = l_k / \sum_{i=1}^{N_p} l_i \quad (1)$$

由初始潮流 x_2 引发的线路 k 的故障概率 $p_k^g(x_2)$ [20] 为

$$p_k^g(x_2) = (\eta_k \times \omega_k \times e_k) / \sum_{i=1}^{N_p} (\eta_i \times \omega_i \times e_i) \quad (2)$$

式中, η_k 、 ω_k 和 e_k 分别表示线路初始负荷率、占系统潮流比重及开断后对其他线路潮流的影响 [22]。

考虑电网继电保护和断路器的拒动、误动因素, 当线路严重过负荷时, 过负荷保护及断路器均正确动作, 后续线路停运成功; 当线路一般过负荷时, 后续线路停运概率包含三部分。

1) 设 f_m^{next} 为线路前后级关联度指标, A_{km} 、 B_{km} 和 H_{km} 分别为潮流波动指标、潮流耦合指标和线路负载率指标。潮流转移 x_3 引起的停运概率 P_1 [20] 可表示为

$$P_1 = f_m^{\text{next}} / \sum_{i=1}^{N_p} f_i^{\text{next}} \quad (3)$$

$$f_m^{\text{next}} = A_{km} \times B_{km} \times H_{km} \quad (4)$$

2) 设 P_{mis_r} 、 P_{mis_c} 、 P_{in_c} 分别为保护误动、断路器误动及断路器拒动的概率。保护和断路器误动等隐性故障因素 x_4 引起的停运概率 P_2 [22] 为

$$P_2 = P_{\text{mis}_r} \times (1 - P_{\text{in}_c}) + P_{\text{mis}_c} \quad (5)$$

3) 恶劣气候、人员失误等偶然因素 x_5 引起的停运概率为 P_3 , 可按常数处理。因此后续线路开断概率 $p_m^g(x')$ 可表示为

$$p_m^g(x') = \begin{cases} (1 - P_{\text{in}_r}) \times (1 - P_{\text{in}_c}), & H_{km} \geq \phi \\ P_1 + P_2 + P_3, & H_{km} < \phi \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{in_r} 为保护拒动的概率; ϕ 为潮流负荷率的极限值, 超过该值时线路严重过负荷。

2.2.2 电力节点失效概率

因相互依存关系, 电力节点依存信息节点 x_6 的失效概率 $p_j^g(x_6)$ 为

$$p_j^g(x_6) = \begin{cases} 1, & \text{与信息节点相依存} \\ 0, & \text{与信息节点不依存} \end{cases} \quad (7)$$

当线路严重过负荷时, 过负荷保护会将其断开, 当电力节点所连线路均断开后, 电力节点成为孤立节点 x_7 而失效, 其失效概率 $p_j^g(x_7)$ 为

$$p_j^g(x_7) = \begin{cases} 1, & \text{电力节点孤立} \\ 0, & \text{电力节点未孤立} \end{cases} \quad (8)$$

2.2.3 信息节点失效概率

从网络拓扑角度, 度数高说明与该节点连接的节点多, 信息网中度数越高的节点承担的发送任务越多, 节点自身更易失效 [20]; 介数高说明网络中任意两个节点的关系受该节点影响大, 该节点在网络的重要度高, 介数越高的节点, 失效后对网络的影响越大, 更易受到网络攻击; 信息网初始数据包的分布及信息节点的负荷约束都会影响数据的传输, 多种因素共同作用造成信息节点失效。本文信息节点的失效考虑受网络拓扑 x_8 、信息占用率 x_9 、网络攻击 x_{10} 、节点过负荷 x_{11} 和依存电力节点 x_{12} 的影响。假定网络初始数据包随机分布, 信息节点因 x_8 、 x_9 、 x_{10} 失效的概率分别为

$$p_j^c(x_8) = k_j / \sum_{i=1}^{N_c} k_i \quad (9)$$

$$p_j^c(x_9) = n_j / \sum_{i=1}^{N_c} n_i \quad (10)$$

$$p_j^c(x_{10}) = g_j / \sum_{i=1}^{N_c} g_i \quad (11)$$

式中: k_j 为信息节点 j 的度数; N_c 为信息网的总节点数目, 且 $N_c > 1$; n_j 为节点 j 的数据包数量; g_j 为信息节点 j 的介数。以信息节点介数表征节点负荷, 节点可承受的负荷是有限的。设 P_c 为信息节点容限系数; L_{0j}^c 、 L_{nj}^c 分别为信息节点初始负荷和当前负荷。信息节点的约束条件 [23] 为

$$L_{nj}^c \leq (1 + P_c) \times L_{0j}^c \quad (12)$$

若不满足式(12), 因 x_{11} 该节点的过负荷失效概率 $p_j^c(x_{11})$ 为

$$p_j^c(x_{11}) = \begin{cases} 1, & \text{节点过负荷} \\ 0, & \text{节点未过负荷} \end{cases} \quad (13)$$

信息节点依存电力节点 x_{12} 的失效概率 $p_j^c(x_{12})$ 为

$$p_j^c(x_{12}) = \begin{cases} 1, & \text{与电力节点相依存} \\ 0, & \text{与电力节点不依存} \end{cases} \quad (14)$$

2.3 风险传递函数

2.3.1 电网线路故障的风险传递函数

电网线路故障的风险传递函数分为初始和后续两种。线路 k 的初始故障概率 p_k^g 受 x_1 (线路老化) 和

x_2 (潮流因素)的影响^[20]。

$$p_k^g = f(x_1, x_2) = p_k^g(x_1) + p_k^g(x_2) \quad (15)$$

后续线路故障概率 $p_m^{g,next}$ 受 x_3 (潮流转移)、 x_4 (隐性故障)和 x_5 (偶然因素)的影响^[20]。

$$p_m^{g,next} = f(x_3, x_4, x_5) = p_m^g(x') \quad (16)$$

2.3.2 电力节点失效的风险传递函数

依存关系为电力节点失效的主要原因, 信息节点失效后, 其依存的电力节点因失去控制而失效。除此以外, 当电力节点失效或线路开断后, 潮流重新分配, 当线路严重过载时, 过电流保护动作, 若电力节点所连线路均断开, 该节点因孤立而失效, 由风险因素 x_6 及 x_7 引起的电力节点失效概率 p_j^g 为

$$p_j^g = f(x_6, x_7) = \begin{cases} p_j^g(x_6), & V_{pi} \text{ 依存 } V_{ci} \\ p_j^g(x_7), & \text{电力节点孤立} \end{cases} \quad (17)$$

2.3.3 信息节点初始失效的风险传递函数

信息节点失效包括自身故障及因网络攻击引起的失效。信息占用率和网络拓扑结构影响节点自身故障概率, 数据包越多、度数越高的节点越容易失效^[20]; 介数越高的节点重要度越高, 更易受到网络攻击。因此, 信息节点初始失效概率 $p_{j,0}^c$ 受风险因素 x_8 、 x_9 和 x_{10} 的影响。

$$p_{j,0}^c = f(x_8, x_9, x_{10}) = p_j^c(x_8) + p_j^c(x_9) + p_j^c(x_{10}) \quad (18)$$

2.3.4 信息节点后续失效的风险传递函数

信息节点后续失效包含自身原因及外部原因, 自身原因为: 信息网拓扑结构改变引起信息上传路径改变, 节点负荷变化, 个别节点因负荷超过约束失效; 外部原因为: 电力节点失效, 依存的信息节点失去电力支持而失效。由风险因素 x_{11} 及 x_{12} 造成的信息节点的后续失效概率 p_j^c 为

$$p_j^c = f(x_{11}, x_{12}) = \begin{cases} p_j^c(x_{11}), & \text{节点过负荷} \\ p_j^c(x_{12}), & V_{ci} \text{ 依存 } V_{pi} \end{cases} \quad (19)$$

3 基于网络依存的连锁故障演化及风险

3.1 CPPS 连锁故障流程

CPPS 连锁故障过程分为网络依存阶段和后续故障阶段, 其中网络依存阶段步骤流程如图 1 所示, 后续故障阶段步骤流程如图 2 所示。

在相互依存的节点失效后, 需重新计算电网线路及信息网节点负荷, 若存在的信息节点因超过约束条件或电力节点孤立而失效, 另一网络中相互依存的节点也会失效。设定结束条件: (1) 系统解列为 3 部分; (2) 系统负荷损失超 30%。

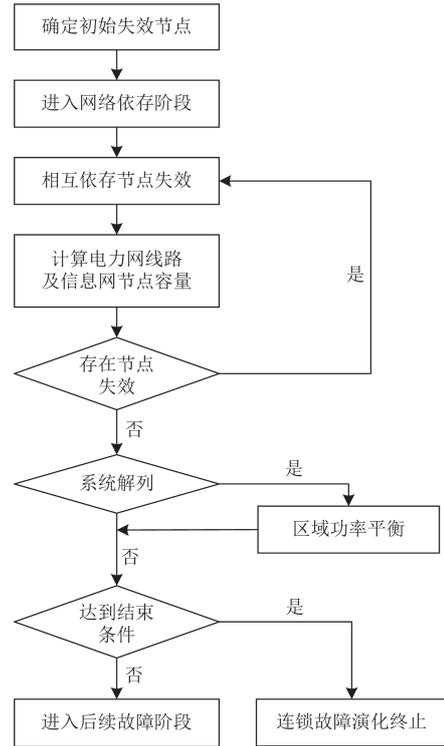


图 1 网络依存阶段流程图

Fig. 1 Flow chart of network dependency phase

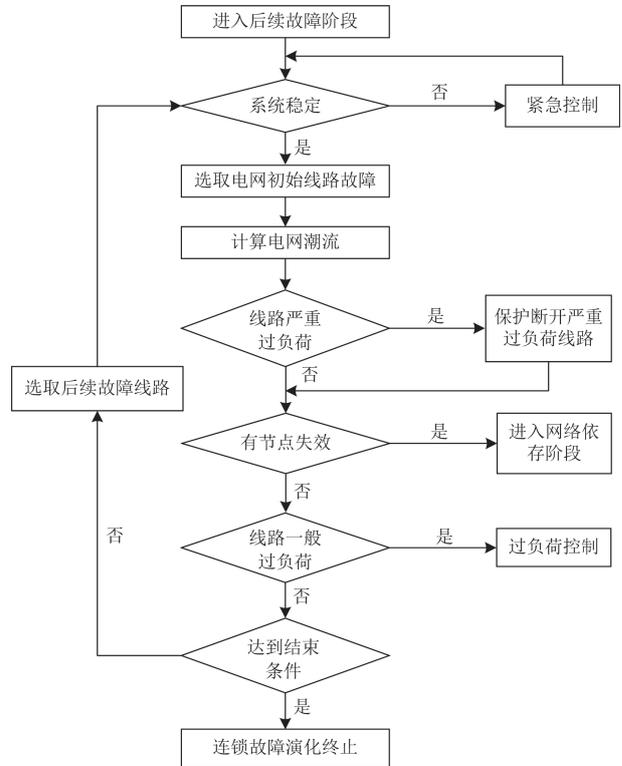


图 2 后续故障阶段流程图

Fig. 2 Flow chart of subsequent failure stage

后续故障阶段在网络依存的基础上, 继续研究连锁故障的传播, 模拟线路过负荷保护动作、调度中心对电网的过负荷控制作用, 主要包括系统暂态判稳、选取电网初始线路故障和后续电网线路故障。

3.2 连锁故障风险评估

当事故发生时, 因继电保护或调度控制, 会切除部分负荷, 以切负荷严重度作为后果^[24]。

$$S(L) = \alpha L \quad (20)$$

式中: L 为切除的负荷功率; α 为系数, 表示负荷重要度, 根据实际情况确定。

电网切负荷严重度用电网失负荷数表示, 信息网中, 以节点介数表征节点负荷, 因此, 可用信息节点失负荷数表示信息网切负荷严重度。

本文结合信息网与电网的切负荷严重度, 将 CPPS 作为一个整体计算风险。由于两网度量单位不同, 因此以失负荷率来表示各自网络的切负荷严重度。在连锁故障各环节中, 导致电力节点及信息节点失效的风险元不同, 造成两网失负荷的原因也不同, 两网失负荷率相加作为 CPPS 连锁故障第 i 环节的后果, 即

$$S_{ev}(S_i) = \alpha \left(\frac{V_{cl} - V'_{cl}(S_i)}{V_{cl}} + \frac{V_{pl} - V'_{pl}(S_i)}{V_{pl}} \right) \quad (21)$$

式中: S_i 为连锁故障第 i 个环节; V_{cl} 、 V_{pl} 和 $V'_{cl}(S_i)$ 、 $V'_{pl}(S_i)$ 分别为信息网和电网第 i 个环节的初始负荷和结束时负荷。连锁故障 S_1 的风险^[20]为

$$R(S_1) = \sum S_{ev}(S_{li}) p_{S_{li}} \quad (22)$$

式中: $p_{S_{li}}$ 为连锁故障 S_1 第 i 个环节内所有相关风险元发生的概率的乘积; $S_{ev}(S_{li})$ 为连锁故障 S_1 第 i 个环节的后果。

4 算例

4.1 初始故障集

以 IEEE39 节点系统为例, 采用 Prim 算法修正社团分区方法进行电网分区, 建立 CPPS 模型^[20]。仿真中信息节点的容限系数 P_c 取 0.2; 潮流负荷率的极限值 ϕ 取 1.4; 假设所有负荷的重要度一样, 因此 α 取 1; 过负荷控制采用基于灵敏度的切机切负荷^[22]。由于骨干层和核心层节点配备有独立电源, 因此可靠性高, 本文仅计算接入层信息节点初始失效概率, 选择其前 10 位形成初始故障集, 如表 2 所示。

4.2 基于依存关系的 CPPS 连锁故障

4.2.1 连锁故障发展过程

在 CPPS 连锁故障演化路径中, 信息节点失效

后, 由于信息网与电网相互依存, 导致依存的电力节点失效, 此时可能存在电力节点孤立或信息节点过负荷的情况, 故障进一步传播, 直至无节点失效, 此阶段为网络依存阶段, 网络依存阶段结束后为后续故障阶段。表 3 以 V_{c8} 、 V_{c27} 失效为例, 分别对网络依存阶段及后续故障阶段的发展做详细描述。

表 2 初始故障集

Table 2 initial fault set

编号	信息节点	失效概率	编号	信息节点	失效概率
1	V_{c16}	0.1851	6	V_{c14}	0.0992
2	V_{c2}	0.1430	7	V_{c17}	0.0967
3	V_{c6}	0.1044	8	V_{c25}	0.0957
4	V_{c8}	0.1008	9	V_{c27}	0.0776
5	V_{c26}	0.0100	10	V_{c15}	0.0757

表 3 V_{c8} 、 V_{c27} 失效连锁故障过程

Table 3 Cascading failure process with V_{c8} and V_{c27} failure as initial fault

初始故障	网络依存阶段	后续故障阶段	风险
V_{c8}	V_{c8} - V_{p8} - V_{c6} 、 V_{c4} V_{p6} 、 V_{p4} - V_{p1} - V_{c1}	无	48.9×10^{-3}
V_{c27}	V_{c27} - V_{p27}	L_{12} - L_{19} - L_6 L_{24} - L_9 - L_{13}	14.8×10^{-3}

表 3 中 V_{c8} 作为初始故障失效, 此时 V_{p8} 与 V_{c8} 存在网络依存关系, 因此 V_{p8} 失效; V_{p8} 失效导致 V_{c6} 、 V_{c4} 过负荷失效, 由网络依存关系可得 V_{p6} 、 V_{p4} 失效。计算信息节点负荷及电网潮流, 断开严重过负荷线路, 此时 V_{p1} 孤立失效, 由网络依存关系可得 V_{c1} 失效。此时无其他节点失效, 系统解列为 3 个区域, 调整各个区域内的功率, 以达到平衡状态, 网络依存阶段结束。由于达到结束条件, 无后续故障阶段, 连锁故障停止。

V_{c27} 失效, V_{p27} 因网络依存关系失效后, 无其他节点失效, 网络依存阶段结束。在后续故障阶段中, 根据风险传递函数, 找出电网初始故障线路 L_{12} 并断开, 调度中心下发控制命令消除 L_{17} 、 L_{18} 的过负荷; 根据风险传递函数选取电网后续故障线路 L_{19} 并断开; L_6 断开后, 系统失稳, 进行紧急控制; 后续依次断开 L_{24} 、 L_9 , 无线路过负荷; L_{13} 断开后, 系统解列为 3 部分, 调整各个区域内的功率, 以达到平衡状态。达到结束条件, 连锁故障停止。

在网络依存阶段, 故障在两网间交互传播, 影响较大; 在后续故障阶段, 故障大多集中于电网, 因此相较于 V_{c27} 、 V_{c8} 风险更大, 失效后影响也更大。

4.2.2 依存关系对连锁故障的影响

以 V_{c27} 为初始故障, 对比网络依存关系对连锁

故障的影响如表 4 所示。表 4 中路径 1 未考虑电网与信息网依存关系, 即 V_{c27} 失效并不会导致 V_{p27} 失效, 电网拓扑结构未改变, 后续 L_3 、 L_4 、 L_{30} 断开, 信息仍能上传至调度中心, 调度中心根据这些信息制定并下发相应控制策略。 V_{c27} 上传 L_{31} 的开断信息, 失效后调度中心未收到 L_{31} 的开断信息, 无控制命令下达, 此时电网解列为三部分, 安稳装置动作。

表 4 网络依存关系对连锁故障的影响

Table 4 Influence of network dependency on cascading failure

场景	事故链	风险
路径 1 未考虑网络 依存关系	V_{c27} - L_3 - L_4 - L_{30} - L_{31}	11.7×10^{-3}
路径 2 考虑网络依 存关系	V_{c27} - V_{p27} - L_{12} - L_{19} - L_6 - L_{24} - L_9 - L_{13}	14.8×10^{-3}

路径 2 考虑两网依存关系, V_{c27} 失效导致 V_{p27} 失效, 电网拓扑结构改变, 后续故障阶段中初始故障线路改变, 进而影响后续事故链的传播。

对比路径 1 与路径 2 间的事事故链风险, 路径 2 风险略大于路径 1。虽然在后续故障阶段中, 路径 1 断开 4 条线路, 路径 2 断开 6 条, 但由于网络依存关系, V_{p27} 失效, 导致 V_{p27} 上所接线路及负荷全部切除, 电网拓扑变化, 此时虽然无线路过负荷, 但电网受损, 可靠性降低, 后续线路断开概率变大。

可见, 相互依存关系会导致耦合系统的结构更加脆弱。以往研究仅基于复杂网络理论, 研究结果过于乐观, 应加强对耦合系统结构脆弱性的研究, 对电网与信息网进行一体化分析, 重新审视复杂网络理论在 CPPS 中的应用。网络依存现象普遍存在于 CPPS 中, 需采取控制措施, 如采用多对多依存方式提高其可靠性, 降低连锁故障风险。

4.3 连锁故障风险计算

4.3.1 连锁故障风险评估

文献[11]中计算 CPPS 风险只考虑电网的负荷损失, 而本文考虑电网和信息网的负荷损失, 分别用风险 1、风险 2 表示本文及文献[11]所提的风险计算方法, 以表 1 的信息节点为初始故障的连锁故障风险, 如图 3 所示。

对比风险 1 和风险 2, 两者变化趋势明显不同。 V_{c17} 失效后, 网络依存关系导致 V_{p17} 失效, L_{25} 连接 V_{p17} 及 V_{p18} , 因 V_{p17} 失效而断开, 后续 L_6 断开, 导致 V_{p18} 孤立失效, 由网络依存关系可得 V_{c18} 失效, 无信息节点和电力节点失效, 后续断开 L_{20} 、 L_{30} 。由于后续故障阶段包含网络依存阶段, 信息网损失变大, 因此风险 1 中 V_{c17} 失效后风险较大, 而风险 2 只考虑电网失负荷率, 忽略了信息网, 导致风险偏低。与风险 2 相比, 综合考虑 CPPS 的电网及信

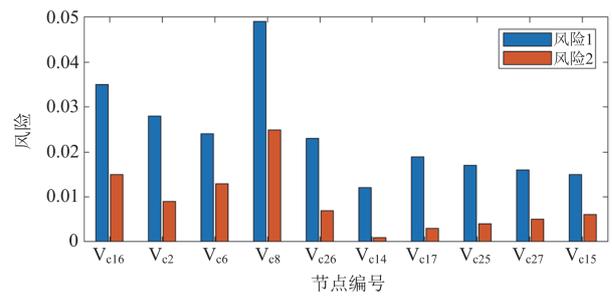


图 3 连锁故障风险

Fig. 3 Cascading failure risk

息网损失, 能较全面地评估连锁故障风险, 具有一定的实际意义。

4.3.2 关键信息节点

信息节点在 CPPS 调度中起重要作用, 信息节点的失效不仅会引起信息网信息传输阻塞, 还会导致电力节点失效, 因此, 识别关键信息节点, 提高关键信息节点可靠性是必要的。综合考虑 CPPS 的电网及信息网损失, 对信息节点进行评估, 能更全面地体现关键信息节点的重要性。

V_{c8} (连接区域 2 和区域 3)失效后, 网络依存关系导致区域 2 和区域 3 内的其他节点 V_{p8} 、 V_{c6} 、 V_{c4} 、 V_{p6} 、 V_{p4} 、 V_{p1} 、 V_{c1} 依次失效, 影响的节点数目较多, 范围较广, 因此连锁故障风险较大。 V_{c16} 失效后, 其他节点并未因网络依存关系而失效, 但连锁故障的风险仍较大, 因为 V_{c16} 虽位于区域 4, 却与区域 2 和区域 3 均有连接, 失效后会对三个区域产生影响, 且影响范围较大。 V_{c16} 失效后, 系统立即解列为三部分, 可见 V_{c16} 在网络中的关键性, 因此其失效的概率最大, 风险也较大。

由 Prim 算法修正社团分区算法得到分区结果^[21], V_{c16} 、 V_{c8} 位于区域的交界处, 至少与两个区域连接, 失效会影响与其相连的区域; 而区域内节点失效只对本区域有影响, 因此, 区域交界处的节点失效后果更严重, 应加强对交界处节点的防控, 避免事故链的发生。

4.4 单一影响因素失效依存阶段风险

计算初始故障集不同影响因素的网络依存阶段平均风险, 仅考虑网络攻击概率为 0.0167, 仅考虑信息节点自身故障概率为 0.0119, 二者结合考虑为 0.0231, 平均风险最高, 仅考虑自身故障时平均风险最低, 这是由于信息节点自身故障与节点的度数及随机失效有关, 度数高说明与该节点相连的节点多; 随机失效并未考虑节点重要性, 存在一定的偶然性。介数高说明网络中该节点在整个网络中的重要度高, 是一种基于全局路径的衡量, 因此, 网络

攻击考虑介数造成的影响比自身故障大。将网络攻击与节点自身故障相结合,综合考虑介数、度数以及随机失效因素,可筛选出影响较大的信息节点,及时做好信息网的防控,避免连锁故障造成更大的损失。

5 结论

本文基于电网与信息网的部分相互依存关系,构建 CPPS 风险元,将风险元理论应用于 CPPS 连锁故障预测。以介数表征信息节点负荷,考虑电网线路及信息网节点在传输过程中的过负荷,提出以电网与信息网失负荷率之和作为后果的风险计算方法,通过风险找出骨干层与接入层中的关键节点。算例分析表明,依存关系会导致部分相互依存网络的结构更加脆弱,需采取控制措施提高 CPPS 的可靠性,降低连锁故障风险。骨干层节点以及区域交界处的接入层节点失效后果严重,应加强对关键节点的防护,以提高信息网的稳定性。对比仅考虑网络攻击、信息节点自身故障的情况,二者结合可筛出影响较大的信息节点,便于及时做好信息网的防控。

参考文献

- [1] 朱炳铨, 郭逸豪, 郭创新, 等. 信息失效威胁下的电力信息物理系统安全评估与防御研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 178-187.
ZHU Bingquan, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A survey of the security assessment and security defense of a cyber physical power system under cyber failure threat[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 178-187.
- [2] 俞华, 穆广祺, 牛津文, 等. 智能变电站网络安全防护应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 38-45.
YU Hua, MU Guangqi, NIU Jinwen, et al. Application research on network security protection of an intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 115-124.
- [3] 杨杰, 郭逸豪, 郭创新, 等. 考虑模型与数据双重驱动的电力信息物理系统动态安全防护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 176-187.
YANG Jie, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A review of dynamic security protection on a cyber physical power system considering model and data driving[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 176-187.
- [4] 赵丽莉, 刘忠喜, 孙国强, 等. 基于非线性状态估计的虚假数据注入攻击代价分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 38-45.
ZHAO Lili, LIU Zhongxi, SUN Guoqiang, et al. Cost analysis of the false data injection attack based on nonlinear state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 38-45.
- [5] 王电钢, 黄林, 刘捷, 等. 考虑负荷虚假数据注入攻击的电力信息物理系统防御策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 28-34.
WANG Diangang, HUANG Lin, LIU Jie, et al. Cyber-physical system defense strategy considering loaded false data injection attacks[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 28-34.
- [6] MATHEBULA V C, SAHA A K. Reliability of IEC 61850 based substation communication network architecture considering quality of repairs and common cause failures[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 174-188.
- [7] BULDYREV S V, PARSHANI R, PAUL G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025.
- [8] HAVLIN S, STANLEY H E, BASHAN A, et al. Percolation of interdependent network of networks[J]. Chaos Solitons & Fractals the Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science & Nonequilibrium & Complex Phenomena, 2015, 72: 4-19.
- [9] DOMENICO M D, SOLÉ-RIBALTA A, COZZO E, et al. Mathematical formulation of multi-layer networks[J]. Physical Review X, 2014, 3(4): 4192-4195.
- [10] GAO J, BULDYREV S V, STANLEY H E, et al. Percolation of a general network of networks[J]. Physical Review E, 2013, 88(6-1).
- [11] 钱宇骋. 过载主导型连锁故障预测和风险控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
QIAN Yucheng. Overload dominated cascading failure pre-diction and risk control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [12] 常昊, 刘吉成, 李存斌. 风电项目前期风险元传递模型研究[J]. 华东电力, 2014, 42(1): 115-118.
CHANG Hao, LIU Jicheng, LI Cunbin. Risk elements transmission model in the earlier stage of wind power project[J]. East China power, 2014, 42(1): 115-118.
- [13] 李鹏, 李存斌, 牛利霞. 考虑信息风险元不确定性的智能电网调度决策风险传递模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(2): 43-49.
LI Peng, LI Cunbin, NIU Lixia. Smart grid dispatching decision-making risk transmission model considering information risk element uncertainty[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2015, 42(2): 43-49.
- [14] 卢东旭. 面向 CPS 的调度控制风险评估方法研究[D].

- 天津: 天津大学, 2017.
- LU Dongxu. Research on scheduling control risk assessment method for CPS[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [15] 石立宝, 简洲. 基于动态攻防博弈的电力信息物理融合系统脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 99-105.
- SHI Libao, JIAN Zhou. Vulnerability assessment of cyber physical power system based on dynamic attack-defense game model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 99-105.
- [16] 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.
- [17] 张殷, 肖先勇, 李长松. 基于攻击者视角的电力信息物理融合系统脆弱性分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 81-88.
- ZHANG Yin, XIAO Xianyong, LI Changsong. Vulnerability analysis of cyber physical power system from attacker's perspective[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 81-88.
- [18] 刘涤尘, 冀星沛, 王波, 等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3615-3621.
- LIU Dichen, JI Xingpei, WANG Bo, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication network based on complex network theory[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3615-3621.
- [19] 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, 15.
- 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, 15.
- [20] 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 and analysis of cascading failures in power system considering typhoon and information factors[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [21] 冀星沛. 基于相互依存网络理论的电力信息-物理系统结构脆弱性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- JI Xingpei. Research on structural vulnerability of power information physical system based on interdependent network theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [22] 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.
- [23] QU Z, XIE Q, LIU Y, et al. Power cyber-physical system risk area prediction using dependent Markov chain and improved grey wolf optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8: 82844-82854.
- [24] 李蓉蓉, 张晔, 江全元. 复杂电力系统连锁故障的风险评估[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 18-23.
- LI Rongrong, ZHANG Ye, JIANG Quanyuan. Risk assessment for cascading failures of complex power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 18-23.

收稿日期: 2022-05-07 修回日期: 2022-11-28

作者简介:

张晶晶(1977—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 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

吴佳瑜(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统连锁故障的建模和控制。E-mail: wjy06011011@163.com

(编辑 许威)