计及信息-能量耦合节点重要度的 主动配电网灾后孤岛划分方法

吴振华1,边晓燕1,周 波1,徐 波1,林 毅2,林伟伟2

(1. 上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院,福建 福州 350012)

摘要:针对自然灾害导致的主动配电网连锁故障问题,提出了一种计及信息-能量耦合节点重要度的主动配 电网灾后孤岛划分方法,以实现对重要节点的持续供电。基于电力网络与电力通信网的耦合关系,以电力网 络为基础网,构建分布式信息物理系统的网络架构,并结合能量流与信息流二者的业务特征,通过主客观相 结合的赋权方法得到耦合节点的重要度;基于全局信息发现模型,通过局部信息交换获取全局信息以完成孤 岛划分模型输入参数的获取,满足灾后的通信需求;通过控制自动开关设备、分布式电源(DG)和储能的开关 状态,将主动配电网划分为多个由DG或DG与储能协同供电的微电网,以实现等效恢复负荷的最大化。通 过算例仿真验证了所提方法的有效性。

关键词:主动配电网;分布式信息物理系统;孤岛划分;信息-能量耦合;节点重要度;混合整数线性规划;自然 灾害

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204073

0 引言

随着环境气候的变化,各类极端天气灾害事件 频发,而配电网所具备的分布广、线路多、用户庞大 等特点决定了其极易受自然灾害的威胁,从而造成 大面积的停电事件,如2011年的日本大地震、2012 年的飓风"桑迪"、2018年的台风"山竹"^[1]。在2011 年的日本大地震和2012年的飓风"桑迪"事件中,当 地的微电网保障了自然灾害期间关键负荷的电力供 应^[2]。因此,有必要针对自然灾害事件发生后,通过 孤岛划分手段形成微电网以实现对关键负荷的可靠 持续供电,提高配电网的弹性。

国内外专家学者对主动配电网的孤岛划分进行 了一系列的研究^[3:9],即在发生故障时,通过孤岛划 分手段将主动配电网划分为多个微电网,以实现对 关键负荷的持续可靠供电。文献[3]提出了一种以 开关状态、分布式电源(distributed generation, DG) 为变量的混合线性规划模型,形成多个由 DG 进行 供电的孤岛微电网;文献[4]将动态孤岛划分问题转 化为静态孤岛划分问题,以开关状态为变量、以节点 重要度和线路介数为指标建立了孤岛划分模型;文 献[5]提出了微电网供电潜力评估方法,并基于此建 立了供电负荷最大化、孤岛数量最小化、孤岛平均供

收稿日期:2021-11-11;修回日期:2022-02-07

在线出版日期:2022-04-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977127);上海市 青年科技英才扬帆计划项目(21YF1414700)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51977127) and Shanghai Sailing Program (21YF1414700) 电水平最大化的多目标孤岛划分模型;文献[6]提出 了利用联络线路先生成最优辐射状配电网,然后进 行多DG孤岛生成的孤岛划分方法。上述研究均以 负荷与节点重要度的乘积加权求和最大化为目标函 数,如何分析节点重要度是关键所在。文献[3]通过 随机生成的方式得到节点重要度,并未考虑节点的 信息与能量之间的耦合;文献[4]采用的节点重要度 考虑了负荷的大小;文献[5]采用的节点重要度以负 荷等级进行衡量;文献[6]基于配电网无向图的边 权,采用相邻节点负荷等级对节点重要度进行刻画。 上述文献在进行孤岛划分时,仅从电网拓扑结构、负 荷大小等单一电气角度衡量节点重要度,并未涉及 信息与能量的耦合。文献[10]描述了信息系统与物 理系统的交互过程,信息系统的故障会导致物理系 统的可靠性大幅下降。因此,鉴于电力网络与电力 通信网之间的深度耦合,有必要在进行孤岛划分时 就节点重要度方面考虑能量与信息的耦合。

已有关于能量与信息耦合的节点重要度评估方 法的研究主要针对输电网进行^[11-14]。文献[11-12] 以电力通信网为基础网,得到电力通信网的节点重 要度,其中:文献[11]基于电力物理-信息相依网络 提取单侧网络,以节点凝聚度为指标得到两侧的节 点重要度,然后根据两网的依存关系得到耦合节点 重要度;文献[12]则以通信效率、网络介数以及节点 度数为衡量指标。文献[13]以电力网络为基础网, 从负载的角度出发,分析了节点级联失效对系统的 影响,从而得到节点重要度。文献[14]针对输电网, 同样以电力网络为基础网,结合信息与能量的不同 业务特征,构建了多项指标对节点重要度进行量化 分析。上述研究均针对电力骨干通信网以及输电 网,而配电网作为覆盖面最广、面向用户、接入分布 式能源的网络,其节点所承接的通信业务与输电网 不同,因此,有必要从能量与信息耦合的角度,对配 电网的节点重要度进行分析,从而为孤岛划分提供 合理的依据。

信息获取是孤岛划分的第1个步骤,而自然灾 害对主动配电网的通信提出了更高的要求。如何在 自然灾害发生后快速建立信息通路,获取系统的状 态信息(如节点功率、线路开关状态等)是孤岛划分 的关键点。文献[3]提出了一种全局信息发现模型, 通过平均一致性算法进行局部信息交换,从而获取 整个系统的状态信息,有效地提高了主动配电网的 弹性。

针对上述问题,本文面向配电网,以电力网络为 基础网,构建了分布式信息物理系统网络架构,考虑 信息流与能量流的不同业务特征、电力网络与电力 通信网的节点相似性以及两网之间的依存关系,通 过 R-G1法与熵权法相结合的组合赋权评价方法得 到各耦合节点的重要度。在此基础上,提出了计及 节点重要度的微电网孤岛划分方法。首先,基于全 局信息发现模型,借助无线网络在灾后快速建立信 息通路,动态获取孤岛划分模型的优化输入参数和 通信网络的拓扑结构,更新耦合节点重要度;然后, 以等效恢复负荷最大化为目标函数对灾后的主动配 电网进行孤岛划分,维持重要节点的持续供电。

1 分布式信息物理系统的节点重要度分析

分布式信息物理系统以传感器为基础,借助无 线网络(如Wi-Fi、ZigBee、5G),通过计算、通信和控 制的有机融合以及深度协作实现了信息网络和物理 系统的紧密结合^[15-16]。分布式信息物理系统的发展 一方面使得电力网络由基于信号的远程控制向基于 信息的分布式智能控制转变;另一方面,也使得能量 流对信息流的依赖越来越强,信息流的故障可能会 穿透电力通信网与电力网络的边界,直接引发电力 网络发生扰动、严重故障、系统失稳,甚至是系统崩 溃^[14]。因此,在分析节点重要度时,需综合考虑信息 流和能量流。

1.1 分布式信息物理系统的两网耦合分析

本文基于 IEEE 34 节点系统,以电力网络为基础网、以电力网络节点为耦合节点建立电力网络与电力通信网深度耦合的分布式信息物理系统,如附录 A图 A1 所示。两网的节点特征具有相似性,以两网耦合模型为基础,从节点入手,采用文献[14]中的相似性评估方法分析两网的相互依存关系,通过节点度数 D_{deg,i}^[12]、节点介数 B_i^[14]、节点效率值 L_i^[14]、节点凝聚度 C_i这4个指标对所映射的节点进行相似性

评估。

节点凝聚度*C*_{*i*}表示节点*i* 失效后网络收缩所减 少的节点数量比例,其值大小与节点重要度呈正相 关关系,计算式为:

$$C_i = k_i / N \tag{1}$$

式中:k_i为节点*i*失效后,网络收缩减少的节点数量; N为网络中的节点数量。

基于上述指标,得到电力网络与电力通信网中 节点*i*的拓扑特征向量 $\psi_i = [D_{deg,i}, B_i, C_i, \bar{L}_i]$ 。根据图 A1所示两网间节点的相互依存关系,得到关联矩阵 K。为了综合体现两网拓扑与节点业务间的耦合关 系,基于斯皮尔曼(Spearman)相关系数分析两网相 关节点对的映射比例,得到耦合节点r的节点标度值 D_r ,为后续节点重要度评估中信息流与能量流不同 指标之间的权重分配提供依据。两网耦合模型的节 点标度值结果如附录A表A1所示。

1.2 计及信息流与能量流的节点重要度分析

耦合节点兼具了能量流与信息流2种业务,二 者截然不同而又互为基础,能量流基于信息流进行 运行、控制以及管理,同时能量流为信息流提供电力 供应,因此,需从信息与能量2个角度出发分析耦合 节点的重要度。

1.2.1 计及信息流的节点重要度分析

信息流包含各类通信业务,用于支撑能源系统的安全、稳定、经济运行。因此,本文从通信业务和通信可靠率2个角度出发,分析计及信息流的节点重要度。

针对通信业务,国内外的研究主要集中于主网 或者骨干网络^[14,17],涉及配电网的研究较少。本文 从配电网的角度出发,考虑到智能配电网、分布式新 能源以及智能用户的接入,分析智能配电网的通信 业务需求,并结合现有的配电网通信业务,采用文献 [14]中的计算方法,得到配电网典型业务的重要度 值,如表1所示。

当电力通信网遭受自然灾害的冲击时,可能会导致电力通信网中的某节点丢失,因此有必要定义 节点通信可靠率用于衡量某节点丢失后对网络通信 的影响^[12]。定义节点*i*的通信可靠率*V_i*^c的计算公 式为:

$$V_{i}^{c} = \frac{E_{0}^{c} - E_{i}^{c}}{E_{0}^{c}}$$
(2)

$$E_{i}^{c} = \frac{1}{M(M-1)} \sum_{j=1}^{m-1} \frac{1}{d_{ij}}$$
(3)

式中:*E*^c₀为未丢失节点时电力通信网的通信可靠 率;*E*^c_i为节点*i*丢失后,电力通信网的通信可靠率;*d*_i 为节点*i*到节点*j*之间最短路径经过的节点数量;*M* 为电力通信网中的节点数量。

表1 配电网典型业务的重要度值

Table 1 Importance value of typical businesses in distribution network

序号	电力通信网业务	重要度值
1	安稳系统	0.9432
2	线路继电保护	0.9428
3	高级配电自动化	0.9047
4	纵联网络保护	0.8947
5	调度自动化	0.8653
6	调度电话	0.8270
7	广域相量测量系统	0.8264
8	电能量计量系统	0.7335
9	负荷需求控制管理	0.6055
10	DG监控	0.6045
11	智能电能表(台区集中点)	0.5718
12	设备运行状态监测信息	0.5583
13	视频会议系统	0.5073
14	雷电监测定位系统	0.4809
15	行政电话	0.4557
16	办公自动化	0.3093

1.2.2 计及能量流的节点重要度分析

与电力通信网不同,电力网络并没有种类繁多的通信业务,但当其遭受自然灾害时,不仅要考虑拓扑结构和负荷分布,还需要考虑功率的集中程度与功率传输^[18-19]。因此,本文从拓扑结构、负荷性质以及电气特性3个角度分析计及能量流的节点重要度,具体指标如下。

1)连通度。

通过系统中节点*i*失效后各节点的平均效率来 衡量节点*i*与其余节点的连通度*L*_i^[12],计算式为:

$$L_{i} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N} \bar{L}_{j}$$
(4)

式中: \bar{L}_j 为节点j的效率值。

2)网络凝聚度。

在遭受自然灾害的冲击时,电力网络的脆弱性 与网络平均路径长度成反比例关系,当平均路径长 度减小时,电力网络的脆弱性显著提高。

$$\alpha_i = \frac{1}{nL_{\text{WAPL},i}} \tag{5}$$

$$L_{\text{WAPL},i} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{N} s_{ij}$$
(6)

式中: α_i 为节点*i*的网络凝聚度; $L_{WAPL,i}$ 为节点*i*收缩 后的平均路径长度;*n*为收缩后网络中的节点数量; s_i 为节点*i*到节点*j*最短路径的长度。

3)负载重要度。

以节点所连接的一级负荷和二级负荷(即中断 供电会造成重大影响的用电负荷)的比例来衡量 该节点的负载重要度^[14],则节点*i*的负载重要度*T_i* 可表示为:

$$T_i = \left(\sum H_i^{1\text{st}} + \sum H_i^{2\text{st}}\right) / H \tag{7}$$

式中:H为节点*i*连接的总负荷量;H^{1st}、H^{2st}分别为节 点*i*连接的一级、二级负荷量。

4)电气介数。

与信息流不同,电能并不通过复杂网络中所定 义的最短路径传输能量,因此基于功率传输分布系 数定义节点*i*的电气介数*I*_{EBC,i}^[18],如式(8)所示。

$$I_{\text{EBC},i} = \sum_{g \in \Omega_{\text{SE}}} \sum_{l \in \Omega_{\text{SE}}} \sum_{j \in \Omega_i} \left| f_{ij}^{gl} \right|$$
(8)

$$f_{ij}^{gl} = \frac{(Z_{ig}^{eq} - Z_{il}^{eq}) - (Z_{jg}^{eq} - Z_{jl}^{eq})}{x_{ii}}$$
(9)

$$Z_{ig}^{eq} = (z_{ii} - z_{ig}) - (z_{ig} - z_{gg})$$
(10)

式中: Ω_{se} 、 Ω_{sk} 分别为电源节点、负荷节点集合; Ω_i 为 与节点*i*直接相连的节点集合; f_{ij}^{gl} 为电源节点g通过 线路*ij*传输给负荷节点*l*的有功功率; Z_{ig}^{eq} 、 Z_{ji}^{eq} 、 Z_{ji}^{eq} 、 Z_{ji}^{eq} 、 Z_{ji}^{eq} 、 Z_{ji}^{eq} 、 Z_{ji} 、 Z_{ji}^{eq} 对别为节点*i*与电源节点g、节点*i*与负荷节点*l*之间的等 效阻抗; z_{ii} 、 z_{gg} 分别为节点*i*、电源节点g的输入阻抗; z_{ig} 为节点*i*到电源节点g的转移阻抗; x_{ij} 为线路ij的 电抗。

5)传输效能变化率。

自然灾害可能会导致电力网络的部分关键节点 丢失,使得网络的连通性和电能传输效能大幅下降, 因此需要考虑电力网络中各节点的传输效能变化 率^[19]。节点*i*传输效能变化率*V*^{*p*}的计算式为:

$$V_i^{\rm P} = \frac{E_0^{\rm r} - E_i^{\rm r}}{E_0^{\rm P}}$$
(11)

$$E_0^{\rm P} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{j,q \in \Omega_N} \frac{1}{d_{jq,\min}}$$
(12)

$$E_{i}^{\mathrm{P}} = \frac{1}{(N-1)(N-2)} \sum_{\substack{j,k \in \Omega_{N} \\ j \neq i, k \neq i}} \frac{1}{d_{jk,\min}}$$
(13)

式中: E_0^p 为未丢失节点时电力网络的传输效能; E_i^p 为节点*i*丢失后电力网络的传输效能; Ω_N 为电力网络的节点集合; $d_{g,min}$ 为节点*j*与节点*q*之间的最短电 气距离,即最小的传输路径阻抗之和。

1.2.3 基于两网耦合标度的耦合节点重要度分析

为了综合分析分布式信息物理系统中各耦合节 点的重要度,本文采用主客观相结合的评价方法,即 采用 R-G1 法与熵权法相结合的组合赋权评价方 法^[12]。R-G1法为相对关系分析法,是一种主观赋权 法,而熵权法为客观赋权法,主客观相结合能得到合 理的耦合节点重要度。耦合节点重要度的分析流程 图如附录A图A2所示,具体计算步骤如下。

1)根据文献[12]提出的指标,从指标项入手,通 过组合赋权法得到各信息流业务的重要度值,结果 如表1所示。

2)根据式(2)—(13)求得电力通信网中各节点 的通信可靠率、通信业务值以及电力网络中各节点 的连通度、网络凝聚度、负载重要度、电气介数、传输效能变化率。

3)通过组合赋权法分别得到电力通信网、电力 网络中各节点的重要度。

4)基于1.1节中的关联矩阵以及耦合节点的标 度值,根据式(14)计算得到耦合节点的重要度。

$$W_r = D_r I_r^{\rm C} + I_r^{\rm P} \tag{14}$$

式中:W,为耦合节点r的重要度; I_r^c 、 I_r^b 分别为耦合节 点r的信息流侧、能量流侧重要度。

2 计及信息-能量耦合节点重要度的微电网 孤岛划分方法

不同于一般的单点故障,自然灾害引起的故障 大多为连锁故障(即多点故障),会使配电网割裂成 多个区域电网。本节基于第1节建立的分布式信息 物理系统网络架构,提出了一种计及信息-能量耦合 节点重要度的微电网孤岛划分方法,主要分为2个 步骤:①建立基于多代理的分布式全局信息发现模 型,获取全局状态信息;②建立以等效恢复负荷最大 化为目标函数的混合线性规划模型,基于全局状态 信息,通过控制DG和储能的输出、线路开关和节点 开关的状态将灾后的主动配电网划分为多个孤岛微 电网,将故障开关隔离在孤岛微电网之外,每个微电 网由DG或DG与储能协同供电,在灾后快速恢复重 要节点的供电。计及信息-能量耦合节点重要度的 微电网孤岛划分方法流程图如图1所示。

2.1 基于平均一致性算法的全局信息发现

本文采用全局信息发现模型^[3],通过局部信息 交换获取全局信息,即得到微电网孤岛划分模型的 输入信息——各节点的有功功率、无功功率、开关状 态以及线路开关状态。模型的实现无需通信基础设 施的支持,各代理之间的通信链接可以通过无线连 接的方式动态形成:

$$p_{m}^{0}[i] = \begin{cases} Mp_{i} & i \in \mathcal{N}_{m} \\ 0 & \notin \mathbb{U} \end{cases}$$
(15)

$$\bar{\boldsymbol{p}}^{0} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{p}_{m}^{0} = [p_{1}, p_{2}, \cdots, p_{N}]^{\mathrm{T}}$$
(16)

式中: $p_{m}^{0}[i]$ 为代理m中节点i的有功功率初始值; p_{i} 为节点i的有功功率; $p_{m}^{0}=[p_{m}^{0}[1],p_{m}^{0}[2],\dots,p_{m}^{0}[N]]$ "为代理m的节点有功功率初始向量; \bar{p}^{0} 为平均有功功率向量;M为系统中的代理数量; \mathcal{N}_{m} 为系统中代理m的节点集合。

通信网络并不依托于配电网的物理结构,而是 通过无线连接建立信息通路,因此可以在发生自然 灾害后动态形成。考虑静态通信网络和动态通信网 络2种场景下的信息交换步长*ε*_m表达式见式(17)。



图1 计及信息-能量耦合节点重要度的微电网 孤岛划分方法流程图

Fig.1 Flowchart of island partition method of microgrid considering importance of information-energy coupling nodes

$$\varepsilon_{mr} = \begin{cases} \frac{2}{\lambda_{2}(L) + \lambda_{M}(L)} & \text{\widehat{P}} \& \& \& \& \\ \frac{1}{\max\{n_{m}, n_{r}\} + 1} & r \in \mathcal{R}_{m} \\ 1 - \sum_{r \in \mathcal{R}_{m}} \frac{1}{\max\{n_{m}, n_{r}\} + 1} & r = m \\ 0 & \text{\widehat{I}} \& \& \end{aligned}$$
(17)

式中: $\lambda_2(L)$ 、 $\lambda_M(L)$ 分别为图的拉普拉斯矩阵L中的 第2、M大特征值; \mathcal{R}_m 为代理m的邻居节点集合; n_m 为通信网络中代理m的度。

2.2 孤岛划分模型

2.2.1 目标函数

基于第1节获得的计及信息-能量耦合的节点 重要度以及2.1节所得系统的状态信息,定义节点*i* 的等效恢复负荷为 $w_i \sum_{k \in \Omega_{rec}} \gamma_{ik} p_i(\Omega_{DG}$ 为微电网集合; w_i 为两网耦合系统中节点*i*的重要度; γ_{ik} 为0-1变量, 表示节点*i*是否恢复供电,若恢复则取值为1,若未 恢复则取值为0),以等效恢复负荷最大化为优化目 标对灾后主动配电网进行孤岛划分,目标函数如式 (18)所示。

$$\max_{v_a, \gamma_a, P_i^t, Q_i^t, V_i^t} \sum_{v_i \in \bar{\mathcal{N}}} w_i \left(\sum_{k \in \Omega_{\text{DG}}} \gamma_{ik} p_i \right)$$
(18)

式中: \bar{N} 为经过预处理之后的节点集合; $v_{ik} \in \{0,1\}$ 为 二元变量,表示节点*i*是否属于微电网*k*,若属于则 取值为1,否则取值为0; s_i 为节点*i*的开关状态; c_{ij} 为 线路*ij*的开关状态; v_{ik} 为节点*i*与微电网*k*的关联变 量; $P_i^k \cdot Q_i^k$ 分别为微电网*k*内节点*i*的有功、无功出 力; V_i^k 为微电网*k*内节点*i*的电压。

2.2.2 约束条件

则需满足:

s;, c;;,

 1)节点约束。 每个节点*i*∈*N*(*N*为节点集合)有且仅有1个微 电网对其进行供电。配电网在遭受自然灾害后,可 能会使某些线路发生永久性故障,因此需要对节点 集合*N*以及线路集合*L*进行预处理,剔除其中无法 与配置DG/储能的节点相连接的节点和线路。经 过预处理之后的节点集合、线路集合分别为*N*、*L*,

$$\sum_{k \in \Omega_{\text{DG}}} v_{ik} = 1 \quad i \in \bar{\mathcal{N}} \tag{19}$$

当节点i处配置 DG_k时,节点i必然属于微电网 k,如式(20)所示。

$$v_{ik}=1 \quad i\in\bar{\mathcal{N}}, k\in\Omega_{\rm DG} \tag{20}$$

2)微电网的连通性约束。

一个辐射状的配电网相当于一棵树,而微电网则相当于根节点为装有DG的节点的子树。由于树的连通性,当节点*i*属于微电网*k*时,其父节点也必然属于微电网*k*,即满足:

 $v_{ik} \leq v_{jk} \quad k \in \Omega_{\text{DG}}, i \in \overline{\mathcal{N}} \setminus \Omega_{\text{DG}}, j \in \theta_{k}(i)$ (21) 式中: $\theta_{k}(i)$ 为微电网k内节点i的父节点集合。

3)微电网支路节点约束。

当节点i与节点j都属于微电网k,即 $v_{ik}=v_{jk}=1$ 时,它们之间的线路ij也属于微电网 k_{\circ} 结合式(21)可以得到,当节点i,j的子节点属于微电网k时,线路ij也属于微电网k,且该线路的状态一定为闭合状态,即满足:

$$c_{ij} = \sum_{k \in \Omega_{\rm bc}} v_{hk} \quad h \in \zeta_{k,ij}, ij \in \bar{\mathcal{L}}$$
(22)

式中: $\zeta_{k,ij}$ 为微电网k中线路ij的子节点。

4)微电网负荷吸收约束。

当节点i的负荷被微电网k拾取时,须满足以下 2个条件:①节点i属于微电网k,即 v_{ik} =1;②节点i的 开关状态处于闭合状态,即 s_i =1。将二者结合,可以 得到约束条件 $v_{ik}s_i$ =1。该约束条件为二次约束,因 此定义一个二元变量 $\gamma_{ik} \in \{0,1\}$ 对其进行线性化处 理,须满足:

$$\gamma_{ik} \leq v_{ik} \quad i \in \mathcal{N}, k \in \Omega_{\rm DG} \tag{23}$$

$$\gamma_{ik} \leq s_i \quad i \in \bar{\mathcal{N}}, k \in \Omega_{\mathrm{DG}} \tag{24}$$

$$\gamma_{ik} \leq v_{ik} + s_i - 1$$
 $i \in \overline{\mathcal{N}}, k \in \Omega_{DG}$ (25)
5)微电网安全运行约束。

在进行微电网孤岛划分时,还需要满足安全运行约束条件,如功率平衡、电压不越限等。在进行孤岛划分时,微电网中可能会含有多个电源,即划分的孤岛微电网中含有 DG 以及储能,此时不再仅仅是单向潮流,因此采用改进的前推回代潮流算法作为运行约束^[20]。

配电网中DG和储能的出力约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{k} \leq P_{k}^{\max} & k \in \Omega_{DG} \\ 0 \leq Q_{k} \leq Q_{k}^{\max} & k \in \Omega_{DG} \\ 0 \leq P_{i}^{k} \leq P_{i}^{\max} & k \in \Omega_{DG}, i \in \Omega_{B} \\ 0 \leq Q_{i}^{k} \leq Q_{i}^{\max} & k \in \Omega_{DG}, i \in \Omega_{B} \end{cases}$$
(26)

式中: P_k 、 Q_k 分别为微电网k中DG的有功、无功出力; Ω_B 为配置储能的节点集合; P_k^{max} 、 Q_k^{max} 分别为微电网k中DG的最大有功、无功出力; P_i^{max} 、 Q_i^{max} 分别为节点i处储能的最大有功、无功出力。

采用改进的前推回代潮流算法须满足如下2个 假设条件:①配电网须为受端电网,即负荷容量须大 于DG容量;②分布在馈线上的负荷为恒功率负荷。 该算法主要包括灵活节点编号、传统的前推回代算 法2个部分,首先通过灵活节点编号确定前推回代 的计算顺序,然后通过传统的前推回代算法计算节 点的潮流和电压。改进的前推回代潮流算法流程图 如附录A图A3所示。

微电网k中各节点的电压均需在安全运行范围 之内,以节点i为例,其节点电压须满足如下约束:

$$V_{\rm R} - \epsilon V_{\rm R} \leq \sum_{k \in \Omega_{\rm pc}} V_i^k \leq V_{\rm R} + \epsilon V_{\rm R} \quad i \in \bar{\mathcal{N}}$$
(27)

式中: $V_{\rm R}$ 为节点的额定电压; ϵ 为电压允许偏差率。

6)配电网环境约束。

由于发生自然灾害,某些线路或者开关会发生 故障而处于开断或者闭合,则相应的状态约束为:

$$c_{ij} = 0 \quad ij \in \mathcal{L}_0 \tag{28}$$

$$c_{ij} = 1 \quad ij \in \mathcal{L}_{\mathsf{C}} \tag{29}$$

$$s_i = 0 \quad i \in \mathcal{N}_0 \tag{30}$$

$$s_i = 1 \quad i \in \mathcal{N}_{\mathcal{C}} \tag{31}$$

式中: \mathcal{L}_{o} 为处于开断状态的故障线路集合; \mathcal{L}_{c} 为因 故障而处于闭合状态的线路集合; \mathcal{N}_{o} 为处于开断状 态的故障节点集合; \mathcal{N}_{c} 为处于闭合状态的故障节点 集合。

3 算例分析

本文基于改进的IEEE 34节点系统对所提方法 进行仿真验证,系统的拓扑结构见附录B图B1。该 配电网中含有DG、储能,配置信息见附录B表B1。 各节点负荷信息如附录B表B2所示。本文建立的 孤岛划分模型实际上是混合整数线性规划模型,因 此调用商业求解器CPLEX进行求解。

3.1 节点重要度计算

根据1.2.3节所述步骤,计算分布式信息物理系统信息流侧、能量流侧以及耦合节点重要度,结果如附录B表B3所示。

将信息流侧、能量流侧以及耦合节点重要度三 者进行归一化后比较,得到节点重要度值分布如图 2所示。分别从3个角度选择重要度值最高的3个 节点:若只考虑信息流,则选择的是节点832、816、 854,所选节点均为多条线路的交点,但忽略了节点 的负荷性质;若只考虑能量流,则选择的是节点 834、836、806,侧重于负荷性质,但忽略了节点在网 络中的关键性;若综合考虑信息流与能量流,则选择 的是节点832、852、850。由此可看出,单一考虑信 息流或能量流都具有一定的局限性,无法合理地反 映节点重要度,为微电网孤岛划分提供可靠的依据。

3.2 计及信息-能量耦合节点重要度的微电网孤岛 划分方法

在发生自然灾害后,配电网有3条线路的开关 处于开断的故障状态、7条线路的开关处于闭合的 故障状态,如附录B图B1所示。各节点的开关状态 如附录B表B2所示,"0"表示开关处于故障开断状 态,"1"表示开关处于故障闭合状态,"0/1"表示开 关处于正常工作状态。

首先,通过全局信息发现模型获取微电网孤岛 划分的输入参数,本文考虑了静态通信拓扑以及动 态通信拓扑2种场景下的应用。当考虑静态通信拓 扑,即通信拓扑已知且不可变时,遭受自然灾害冲击 后,通过无线网络等恢复信息通路。以节点806的 有功功率以及线路806-808的开关状态为例,静态 全局信息发现收敛性分析结果如图3所示。由图3 (a)可看出,各节点关于节点806有功功率的获取可 以较快地收敛至27.56 kW,所有节点完成了对节点 806有功功率的获取。由图3(b)可看出,所有节点 关于线路806-808的开关状态也较快地收敛至1,即 该线路开关处于正常工作状态。同理,其他节点的 有功功率、无功功率、开关状态以及线路开关状态可 以通过该途径实现全局信息获取。当考虑动态通信 拓扑,即通信拓扑未知且不可变时,遭受自然灾害冲 击后,通过无线网络等动态形成信息通路。同样以 节点806的有功功率以及线路806-808的开关状态 为例,动态全局信息发现收敛性分析结果如图4所 示,可见二者都可以较快地收敛。



global information discovery

在获取输入信息的同时,更新电力通信网的拓扑结构,然后计算更新后耦合节点的重要度值,结果如附录B表B4所示。在进行微电网孤岛划分时,若 仅考虑能量流侧节点重要度,则等效恢复负荷为 786.20 kW,微电网孤岛划分结果如附录B图B2所示;若同时考虑信息流侧与能量流侧的节点重要度,则等效恢复负荷为1741.79 kW,微电网孤岛划分结 果如图5所示。通过对比可知,当综合考虑信息流 侧与能量流侧的节点重要度时,等效恢复负荷更多, 可以有效地覆盖重要度高的节点以及关键线路,合



Fig.2 Distribution of node importance value

理优化节点恢复集,使得整个配电网可以在后续的 过程中更快速地恢复供电。



↓ 处于开断状态的故障开关,□ 线路开关开断

图 5 计及信息-能量耦合节点重要度的 微电网孤岛划分结果

Fig.5 Island partition results of microgrid considering importance of information-energy coupling nodes

4 结论

在配电网信息化、智能化的发展趋势下,本文考 虑信息与能量的深度耦合,提出了计及信息-能量耦 合节点重要度的微电网孤岛划分方法。通过分布式 信息物理系统网络架构,将电力通信网映射到电力 网络中,采用R-G1法与熵权法相结合的组合赋权评 价方法对各节点重要度进行评估,可有效避免从信 息或能量单一角度评估所造成的不合理结果。分别 针对静态通信网络和动态通信网络,选择合适的信 息交换步长进行全局信息发现,可有效获取系统状 态信息。基于能量和信息耦合节点的重要度与系统 状态信息,在进行孤岛划分时可合理优化节点恢复 集,覆盖重要度更高的节点,维持其持续供电,提高 了系统应对自然灾害的能力。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 杜诗嘉,郭创新,俞啸玲,等. 台风灾害下的弹性配电网研究综 述与展望[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):176-186,209. DU Shijia, GUO Chuangxin, YU Xiaoling, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186,209.

- [2] MARNAY C, AKI H, HIROSE K, et al. Japan's pivot to resilience: how two microgrids fared after the 2011 earthquake
 [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3):44-57.
- [3] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2):958-966.
- [4] 董海鹰,王荣.含光伏电源的配电网动态孤岛划分策略[J]. 太阳能学报,2019,40(7):1950-1958.
 DONG Haiying,WANG Rong. Dynamic Island partition strategy for distribution networks with photovoltaic power [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2019,40(7):1950-1958.
- [5]张晓雪,牛焕娜,赵静翔,等.考虑微电网供电潜力的配电网孤岛划分[J].电力自动化设备,2016,36(11):51-58.
 ZHANG Xiaoxue, NIU Huanna, ZHAO Jingxiang, et al. Distribution network island partition considering potential power-supply of microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(11):51-58.
- [6] 冯雪平,宋晓辉,梁英,等. 基于最小生成树及改进遗传算法的 含分布式电源配电网孤岛划分方法[J]. 高电压技术,2015,41 (10):3470-3478.

FENG Xueping, SONG Xiaohui, LIANG Ying, et al. Islanding method based on minimum spanning tree and improved genetic algorithm for distribution system with DGs [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3470-3478.

- [7] 徐岩,张荟,孙易洲. 基于变异粒子群算法的主动配电网故障恢复策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(12):45-53.
 XU Yan, ZHANG Hui, SUN Yizhou. Fault recovery strategy of active distribution network based on mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(12):45-53.
- [8] 郝丽丽,陈从霜,王川,等. 基于恢复价值动态评估的配电网恢 复控制决策[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):73-80,96.
 HAO Lili, CHEN Congshuang, WANG Chuan, et al. Restoration control strategy of distribution network based on dynamic evaluation of restoration value[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):73-80,96.
- [9] 徐岩,张荟,马天祥,等.含分布式电源的配电网故障紧急恢 复与抢修协调优化策略[J].电力系统自动化,2021,45(22): 38-46.

XU Yan, ZHANG Hui, MA Tianxiang, et al. Coordinated optimization strategy of fault emergency recovery and repair for distribution network with distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22):38-46.

- [10] 曾广璇,余涛,林丹,等. 基于分布式馈线自动化的配电信息物 理系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):57-68. ZENG Guangxuan,YU Tao,LIN Dan,et al. Reliability assessment of cyber physical distribution system based on distributed feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020,40(12):57-68.
- [11] 李炅菊,黄宏光,舒勤.相依网络理论下电力通信网节点重要 度评价[J].电力系统保护与控制,2019,47(11):143-150.
 LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory[J]. Power System Protection and Control,2019,47(11):143-150.
- [12] GUO S Y, MIAO S H, YIN H R, et al. Construction of coupling model and evaluation of node importance for electric sensor communication network[C] //2020 IEEE 1st

81

China International Youth Conference on Electrical Engineering. Wuhan, China; IEEE, 2020; 1-6.

- [13] 吴润泽,张保健,唐良瑞.双网耦合模型中基于级联失效的节点重要度评估[J]. 电网技术,2015,39(4):1053-1058.
 WU Runze,ZHANG Baojian,TANG Liangrui. A cascading failure based nodal importance evaluation method applied in dual network coupling model[J]. Power System Technology, 2015, 39(4):1053-1058.
- [14] 龚钢军,张哲宁,张心语,等.分布式信息能源系统的耦合模型、网络架构与节点重要度评估[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5412-5426.

GONG Gangjun,ZHANG Zhening,ZHANG Xinyu, et al. Coupling model, network architecture and node importance evaluation of distributed information energy system [J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(17):5412-5426.

- [15] 刘方泽,牟龙华,何楚璇. 微能源网信息物理系统模型及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(17):16-23.
 LIU Fangze, MU Longhua, HE Chuxuan. Modeling and control of cyber physical system for micro-energy network[J]. Power System Protection and Control,2018,46(17):16-23.
- [16] 阳育德, 蓝水岚, 覃智君, 等. 电力信息物理融合系统的网络-物理协同攻击[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2):97-103.
 YANG Yude, LAN Shuilan, QIN Zhijun, et al. Coordinated cyber-physical attacks of cyber-physical power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2):97-103.
- [17] 李昌超,康忠健,于洪国,等.考虑电力业务重要性的电力通信 网关键节点识别[J].电工技术学报,2019,34(11):2384-2394.
 LI Changchao,KANG Zhongjian,YU Hongguo,et al. Identification of key nodes in power communication network considering the importance of power businesses[J]. Transactions of

China Electrotechnical Society, 2019, 34(11):2384-2394.

- [18] 李昌超,康忠健,于洪国,等. 基于 PageRank 改进算法的电力 系统关键节点识别[J]. 电工技术学报,2019,34(9):1952-1959.
 LI Changchao,KANG Zhongjian,YU Hongguo, et al. Identification method of key nodes in power system based on improved PageRank algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(9):1952-1959.
- [19] 林冠强,莫天文,叶晓君,等. 基于TOPSIS和CRITIC法的电网 关键节点识别[J]. 高电压技术,2018,44(10):3383-3389.
 LIN Guanqiang, MO Tianwen, YE Xiaojun, et al. Critical node identification of power networks based on TOPSIS and CRITIC methods[J]. High Voltage Engineering,2018,44(10):3383-3389.
- [20] 张立梅,唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算
 [J]. 电工技术学报,2010,25(8):123-130.
 ZHANG Limei, TANG Wei. Back / forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J].
 Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-130

作者简介:



吴振华(1997—),男,硕士研究生,主要 研究方向为主动配电网的故障恢复以及 信息物理系统(E-mail:wzh_wuzhenhua@163. com);

边晓燕(1976—),女,教授,博士,通信 作者,主要研究方向为新能源发电与控制、 电力系统分析与稳定性(E-mail:kuliz@163. com)。

吴振华 ^{CC}

(编辑 陆丹)

Island partition method of active distribution network after disaster considering importance of information-energy coupling nodes

WU Zhenhua¹, BIAN Xiaoyan¹, ZHOU Bo¹, XU Bo¹, LIN Yi², LIN Weiwei²

(1. College of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Economic and Technology Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350012, China) Abstract: Aiming at the chain failures of active distribution network caused by natural disasters, an island partition method of active distribution network after disaster considering the importance of informationenergy coupling nodes is proposed to realize the continuous power supply to important nodes. Based on the coupling relationship between power network and power communication network, the network architecture of distributed cyber-physical system is constructed with power network as the basic network. Combining the business characteristics of energy flow and information flow, the importance of coupling nodes is obtained by the weighting method combining subjective and objective. Based on the global information discovery model, the global information is obtained through local information exchange to complete the acquisition of the input parameters for the island partition model and meet the communication requirements after disaster. By controlling the switching state of automatic switchgear, distributed generation (DG) and energy storage, the active distribution network is divided into several microgrids powered by DG or DG in cooperation with energy storage to maximize the equivalent recovery load. The effectiveness of the proposed method is verified by the example simulation.

Key words: active distribution network; distributed cyber-physical system; island partition; information-energy coupling; node importance; mixed-integer linear programming; natural disaster



图 A1 分布式信息物理系统的耦合网络模型

Fig.A1 Coupling network model of distributed cyber-physical system

表 A1 两网耦合模型的节点标度值 Table A1 Node scale value of two-network counting model

		Table A	I INDUE SU	ale value of two-fietw	ork coupi	mg mouer		
节点序号	关联关系	标度值	节点序号	关联关系	标度值	节点序号	关联关系	标度值
1	1° , $35^{\circ} \rightarrow 1^{\circ}$	1.9256	13	13 ^c	0.9972	25	25° , $38^{\circ} \rightarrow 25^{\circ}$	1.9885
2	$2^{\rm C}$	0.9889	14	14° , $36^{\circ} \rightarrow 14^{\circ}$	1.8768	26	26° , $39^{\circ} \rightarrow 26^{\circ}$	1.9256
3	3 ^c	0.9889	15	15 [°]	0.9889	27	27 ^c	0.9750
4	4 ^C	0.9750	16	$16^{\circ}, 39^{\circ}, 40^{\circ} \rightarrow 16^{\circ}$	2.7887	28	28 ^c	0.9972
5	5° , $35^{\circ} \rightarrow 5^{\circ}$	1.9256	17	17 ^c	0.9750	29	29 ^c	0.9750
6	6 ^C	0.9889	18	18 ^C	0.9750	30	30 [°]	0.9889
7	7° , $38^{\circ} \rightarrow 7^{\circ}$	1.9885	19	19 ^C	0.9972	31	31 ^c	0.9889
8	8° , $36^{\circ} \rightarrow 8^{\circ}$	1.7448	20	20 [°]	0.9972	32	32° , $37^{\circ} \rightarrow 32^{\circ}$	1.9719
9	9 ^c	0.9889	21	21° , $37^{\circ} \rightarrow 21^{\circ}$	1.9141	33	33° , $40^{\circ} \rightarrow 33^{\circ}$	1.9884
10	10 ^C	0.9889	22	22 ^c	0.9889	34	34 ^c	0.9972
11	11 ^C	0.9972	23	23 ^c	0.9889			
12	12 ^C	0.9750	24	24 ^c	0.9972			

注: 上标 P、C 分别表示电力网络节点、通信网节点。













Fig.B1 Topology structure of modified IEEE 34-bus system

			表 B1 DG 及f	储能的配置	信息		
	Т	Table B1 Conf	iguration inform	nation of DC	Bs and energ	gy storage	
配置对象	所在节点	有功功率/kW	无功功率/kvar	配置对象	所在节点	有功功率/kW	无功功率/kvar
DG_1	810	70	45	Bess ₁	806	15	10
DG_2	820	105	68	Bess ₂	826	30	18

Bess₃

 $Bess_4$

Bess₅

7.5

DG₃

 DG_4

 DG_5

表 B2 节点负荷信息 Table B2 Node load information

			Tuelle BE Tieu	e iouu mitorim	ation		
节点	有功功率/kW	无功功率/kvar	节点状态	节点	有功功率/kW	无功功率/kvar	节点状态
800	30	15	0	836	61	31.5	0/1
802	27.5	14.5	0/1	838	14	7	1
806	27.56	14.5	0/1	840	47	31	0/1
808	8	4	1	842	4.5	2.5	0/1
810	8	4	0/1	844	432	329	0
812	16	8	0/1	846	34	17	0/1
814	24	12	0/1	848	71.5	53.5	1
816	2.5	1	0/1	850	26	13	0/1
818	17	8.5	0/1	852	36	18	0/1
820	84.5	43.5	0/1	854	10	5	0/1
822	67.5	35	0	856	8	4	0/1
824	24.5	12	0/1	858	24.5	12.5	0
826	20	10	0/1	860	174	106	0/1
828	5.5	2.5	0/1	862	14	7	0/1
830	48.5	21.5	0/1	864	1	0.5	0/1
832	7.5	3.5	0/1	888	100	50	0/1
834	89	45	0/1	890	450	225	1

表 B3 信息流侧、能量流侧以及耦合节点重要度

	Table B3	Information flo	w side,energy	flow side	and coupling no	ode importance		
-++- F-	信息流侧	能量流侧	耦合节点	-++- F	信息流侧	能量流侧	耦合节点	
二 二 二	节点重要度	节点重要度	重要度	見	节点重要度	节点重要度	重要度	
800	0.7167	0.7038	2.0839	836	0.7582	0.7771	1.5163	
802	0.5568	0.5585	1.1092	838	0.5212	0.4337	0.9534	
806	0.6240	0.7418	1.3589	840	0.5403	0.5148	1.0536	
808	0.7457	0.5623	1.2894	842	0.6673	0.4918	1.7691	
810	0.6780	0.6853	1.9908	844	0.5997	0.7028	1.2958	
812	0.7114	0.5069	1.2104	846	0.5786	0.4607	1.0328	
814	0.7496	0.5300	2.0206	848	0.5956	0.5917	1.1856	
816	0.9000	0.5150	2.0853	850	0.8526	0.5664	2.2618	
818	0.5892	0.4722	1.0548	852	0.8730	0.6316	2.3126	
820	0.6731	0.6743	1.3400	854	0.8761	0.5466	1.4008	
822	0.5178	0.5471	1.0634	856	0.6128	0.7116	1.3227	
824	0.5940	0.5111	1.0903	858	0.8102	0.5010	1.2910	
826	0.5865	0.7230	1.3079	860	0.6629	0.6542	1.3097	
828	0.8599	0.5086	2.1224	862	0.6000	0.5636	1.1569	
830	0.8563	0.7048	1.5516	864	0.5386	0.4576	1.5198	
832	0.9600	0.7087	3.3859	888	0.5377	0.6507	1.7198	
834	0.7846	0.8116	1.5765	890	0.5063	0.6513	1.1561	

			- F		r r		
-++ _E	信息流侧	能量流侧	综合节点	-++ -E	信息流侧	能量流侧	综合节点
 口口	节点重要度	节点重要度	重要度	見	节点重要度	节点重要度	重要度
800	0.7228	0.7038	2.0957	836	0.7650	0.7771	1.4655
802	0.5589	0.5585	1.1112	838	0.5228	0.4337	0.9550
806	0.7165	0.7418	1.4564	840	0.5449	0.5148	1.0582
808	0.7192	0.5623	1.2096	842	0.6707	0.4918	1.7756
810	0.6864	0.6853	2.0501	844	0.6016	0.7028	1.2978
812	0.7047	0.5069	1.2096	846	0.5808	0.4607	1.0351
814	0.7415	0.5300	2.0046	848	0.5993	0.5917	1.1893
816	0.8889	0.5150	2.0658	850	0.8450	0.5664	2.2466
818	0.5891	0.4722	1.0547	852	0.8810	0.6316	2.0704
820	0.6766	0.6743	1.3434	854	0.8513	0.5466	1.3127
822	0.5189	0.5471	1.0645	856	0.6166	0.7116	1.3265
824	0.5798	0.5111	1.0330	858	0.7968	0.5010	1.2779
826	0.5890	0.7230	1.3104	860	0.6666	0.6542	1.3134
828	0.8488	0.5086	1.9519	862	0.6279	0.5636	1.1898
830	0.8390	0.7048	1.5345	864	0.5426	0.4576	1.5409
832	0.9170	0.7087	3.2661	888	0.5359	0.6507	1.7163
 834	0.7987	0.8116	1.5903	890	0.5062	0.6513	1.1561

800 802 806 O 808 810 812 814 850 818 81 822 -824 828 830 826 854 -858 852 864 888 🇅 856 834 - 🛆 890 🔘 -842 844 860 846 848 配置DG的节点 \square Δ 配置储能的节点 836 1 **•••••** 处于闭合状态的故障开关 838 862 处于开断状态的故障开关 **•** 840 恢复供电节点 线路开关开断

图 B2 计及能量流侧节点重要度的微电网孤岛划分结果 Fig.B2 Island partition results of microgrid considering importance of nodes at energy flow side

表 B4 更新后的耦合节点重要度 Table B4 Updated coupling node importance