

高比例可再生能源接入下自愈性能的 分布式配电网重构策略研究

吴任博^{1,2}, 黄奕俊¹

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东省 广州市 510000; 2. 山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061)

Research on Reconfiguration Strategy of Distributed Distribution Network With Self-Healing Performance Under High-Proportion Renewable Energy Access

WU Renbo^{1,2}, HUANG Yijun¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China)

摘要:【目的】随着可再生能源电网占比逐年增加, 电网的波动性和不确定性显著提升, 给配电网的安全运行带来挑战。针对高比例新能源电网分布式配网重构问题, 提出一种在线滚动优化框架方法。【方法】通过分布式共识协议获取网络拓扑和节点运行信息, 在 $N-1$ 和 $N-2$ 线路故障状态下自动重构, 实现配电网无额外外部触发信号情况下自动恢复正常运行, 保证电网经济运行。同时采用滚动优化方法处理高比例可再生能源所导致的电网波动问题, 并利用生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)技术生成新数据, 结合历史数据实现电网运行数据高精度预测。【结果】所提方法在正常状态、单点故障和两点故障3种情况下, 均能实现电网的自动经济运行优化和自愈修复。【结论】与鲁棒规划和随机规划等方法相比, 所提出方法可提升电网预测精度。

关键词: 可再生能源; 分布式电源; 配电网重构; 配电网自愈; 高比例新能源; 分布式优化; 滚动优化

ABSTRACT: [Objectives] As the proportion of renewable energy in power grids increases year by year, the volatility and uncertainty of the grid are significantly heightened, posing challenges to the safe operation of distribution networks. To address the issue of distributed network reconfiguration in high-proportion renewable energy grids,

this paper proposed an online rolling optimization framework. [Methods] The framework utilized a distributed consensus protocol to obtain network topology and node operation information. It can enable automatic reconfiguration in the event of $N-1$ and $N-2$ line failures, allowing the distribution network to automatically restore normal operation without the need for additional external triggering signals, thus ensuring economic operation of the grid. Additionally, a rolling optimization method was employed to handle grid fluctuations caused by the high proportion of renewable energy, and generative adversarial network (GAN) technology was used to generate new data, which combined with historical data. It can help to achieve high-precision forecasting of grid operation data. [Results] The proposed method can achieve automatic economic optimization and self-healing in normal, single-point failure, and two-point failure scenarios. [Conclusions] This method provides an effective solution for ensuring the safe operation of distributed networks in high-proportion renewable energy grids.

KEY WORDS: renewable energy; distributed generator; distribution network reconstruction; distribution network self-healing; high proportion of new energy; distributed optimization; look-ahead optimization

0 引言

随着可再生能源在配电网(distribution network, DN)中的渗透率不断提高, DN的规划和运营面临着巨大的压力, 因此确保DN安全可靠地运行显得尤为重要^[1-3]。配电网重构

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1512700); 南方电网配网自动化技术改进项目(080016GS62210001)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2020YFC1512700); Southern Power Grid Distribution Automation Technology Improvement Project (080016GS62210001).

(distribution network reconstruction, DNR)是通过改变远程可控开关状态来优化配电系统技术,从而提高系统可靠性和供电经济性的关键手段^[4-8]。由于DN结构复杂,接入设备种类繁多,并且容易受到外部因素的干扰和影响,因此DN的故障不可避免^[9]。DN中有大量常闭分段开关和少量常开联络开关,DNR主要通过改变其中部分交换机的开关状态来调整配电网的拓扑结构^[10]。利用DNR,根据系统的实际运行情况来看改变开关状态以调整网络结构,不仅可以减少网络损耗,平衡负载和提高供电电压质量,还可以消除过载,提高系统的经济性^[11]。因此,DNR已成为配电系统优化运行的重要手段之一。目前DNR主要可以分为2类:正常情况下的配电网重构和故障后配电网重构^[12-13]。

配电网故障恢复重构是一个复杂的混合整数非线性组合优化问题,可以建模为一个涉及大量不确定因素且极其复杂的实时决策过程^[14-15]。针对该问题,现有的线性数值分析技术难以提供有效的解决方案,必须配备调度员,根据经验现场做出决策。在面对如此复杂紧急的情况时,调度员很难凭借自己有限的经验和直觉,采取正确有效的措施,以尽可能地减少事故损失^[16]。DNR优化的目标是降低网络有功功率损耗、平衡负载、提高DN的可靠性和供电质量。文献[15]以降低系统运行成本为目标,建立了DNR模型,系统运行成本包括电力购买成本、开关运行成本和分布式电源运行成本。在文献[17-18]中提出一种考虑了重构目标中切换操作次数的重构方法,并将重构周期内的最小切换操作次数作为目标函数之一。文献[19]提出了一种新的DN重新配置策略,该策略考虑了N-1安全准则,并将降低安全风险作为优化目标之一。

近年来,随着分布式电源(distributed generation, DG)的普及,DN系统发生了巨大变化。其中,可再生能源(光伏发电、风力发电等)的引入使得DG的波动增大,这给DN带来了很大的挑战^[20-22]。由于具有环保、易于安装等特点,DG以小规模和分布式方式连接到DN,DG的并网模式也显著改善了传统的能源结构^[23]。文献[24]

考虑了风速的统计特性,并将风电出力的不确定性转化为易于解决的3种确定性场景,从而建立了考虑风电出力的多场景模型。在文献[25]中,针对不可控风电出力的随机特性,提出了一种带有DG的重构方案,根据不同的输出将被控状态划分为多个不同的性能状态,以模拟风电出力的随机特性。文献[26-27]根据需求响应的概念,综合考虑DG和电动汽车(electric vehicle, EV)的随机性,建立了以DN的经济运行为目标函数的优化模型,分别考虑使用电价的高峰和低谷时间的动态模型,并分析了EV在3种不同充放电策略下对配电的影响。实际上,分布式DNR更符合DN,这是未来发展的趋势。

针对可再生能源电网中配电网重构问题,本文提出一种基于分布式一致性共识机制的配电网在线优化方法,利用滚动优化的思想解决可再生能源渗透下的DNR问题。

1 问题描述与策略

1.1 系统模型及重构方法

考虑一个具有 N 个节点的DN系统,该系统由一个节点集合 $V=\{1,2,\dots,m,\dots,N\}$ 组成。同时,该系统具有由一组边集 $E\subseteq V\times V$ 来表示的无向通信拓扑 $G=(V,E)$,其中一对 $(i,j)\in E$ 表示节点 i 和节点 j 之间的通信边。节点0表示上游变电站,其他节点根据实际情况确定表示可调度的微型燃气轮机(micro gas turbine, MGT)、光伏(photovoltaic, PV)或风力涡轮机(wind turbine, WT),定义可调度的MGT的集合为 N^M 。

本文针对具有总成本最小化的重构问题,提出一种混合整数规划的建模方法,目标函数由时间 t 到时间 H 的4个部分组成:调度MGT的总运营成本、从上游变电站购买的电价、电力损失成本和停电造成的损失,具体的计算公式为

$$\min_{P_i(t), Q_i(t), s_i(t), a_{ij}(t)} \sum_t^H [C^G \cdot P_0(t) + \sum_{i=1}^m C^M \cdot P_i^M(t) + \sum_{(i,j) \in E} C^{\text{Loss}} \cdot P_{ij}^{\text{Loss}}(t) + P_s(t)] + C^s N_s \quad (1)$$

式中: $P_0(t)$ 为 t 时刻从上游变电站购买的电力,对应单价为 C^G ; C^s 为与交换机相关的成本系数;

N_s 为计算交换机操作的总数； $P_i^M(t)$ 和 $P_{ij}^{\text{Loss}}(t)$ 分别为 t 时刻第 i 个MGT产生的调度功率和节点 i 、 j 之间的功率传输损耗，对应的单位成本分别为 C^M 和 C^{Loss} 。

当需要重新配置电源DN时，必须切换一些开关，这将导致一定的负载被关闭，引起负载下降，即 $P_s(t) = \sum_{i=1}^N C^\lambda \cdot s_i(t) P_D(t)$ ，其中， C^λ 为 t 时刻每个节点 i 的成本， $P_D(t)$ 、 $s_i(t)$ 分别为需求功率和因数。

1.2 潮流约束

网络重构问题(1)的潮流约束条件为：

$$\underline{\eta}_i \leq \eta_i(t) \leq \bar{\eta}_i, i \in N \quad (2)$$

$$0 \leq \delta_{ij}(t) \leq \bar{\delta}_{ij}, (i,j) \in E \quad (3)$$

$$\underline{P}_i^M \leq P_i^M(t) \leq \bar{P}_i^M, i \in N^M \quad (4)$$

$$\underline{Q}_i^M \leq Q_i^M(t) \leq \bar{Q}_i^M, i \in N^M \quad (5)$$

式中： η_i 为节点 i 的电压值； $\bar{\eta}_i$ 、 $\underline{\eta}_i$ 分别为节点 i 电压值的上下限约束； N 为DN系统中节点的集合； δ_{ij} 为网络重构之后节点 i 和 j 之间的电流值； $\bar{\delta}_{ij}$ 为网络重构之后节点 i 和 j 之间电流的上限约束； E 为DN系统中节点之间线路的集合； $\underline{P}_i^M$ 、 $\bar{P}_i^M$ 分别为第 i 个MGT有功出力 $P_i^M(t)$ 的下限约束和上限约束； $Q_i^M(t)$ 为 t 时刻第 i 个MGT产生的无功功率； $\underline{Q}_i^M$ 、 $\bar{Q}_i^M$ 分别为第 i 个MGT无功出力的下限约束和上限约束。

定义2个布尔参数 $\alpha_{ij}(t) \in \{0, 1\}$ ， $\omega_{ij}(t) \in \{0, 1\}$ ，其中 $\alpha_{ij}(t)$ 是一个二进制变量。在 t 时刻，如果线路 (i,j) 能够连通，则设置为1，否则设置为0。 $\omega_{ij}(t)$ 也是一个二进制变量，如果总线为连接总线的母线，则设置为1，否则设置为0，并且在 t 时刻 $\omega_{ij}(t)=0, i \in \{0\}$ 。式(6)一(8)是与DN的径向结构和连通性相关的生成树约束，其表示除上游变电站总线外的所有总线都有一个母线。

$$\omega_{ij}(t) + \omega_{ji}(t) = \alpha_{ij}(t), \forall (i,j) \in E \quad (6)$$

$$\sum_{j:i \rightarrow j} \omega_{ij}(t) = 1, \forall i \in N \setminus \{0\}, (i,j) \in E^* \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in E^*} \alpha_{ij}(t) = |N| - 1 = 0, (i,j) \in E^* \quad (8)$$

式中 E^* 表示网络重构之后线路的集合。

式(9)是Dist-Flow函数的校正版本，它能在预

定义的网络流上进行搜索。式(10)表示任意2个连接的节点之间的关系。式(11)为非线性等式约束的松弛模型，这使得Dist-Flow函数是凸的。

$$\begin{cases} P_j(t) = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk}(t) - \sum_{i:i \rightarrow j} [P_{ij}(t) - \phi_{ij} \delta_{ij}(t)], \forall j \in N \\ Q_j(t) = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk}(t) - \sum_{i:i \rightarrow j} [Q_{ij}(t) - x_{ij} \delta_{ij}(t)], \forall j \in N \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \eta_i(t) - \eta_j(t) \geq -M[1 - \alpha_{ij}(t)] + 2[\phi_{ij} P_{ij}(t) - (\phi_{ij}^2 + x_{ij}^2) \delta_{ij}(t)], \forall (i,j) \in E^* \\ \eta_i(t) - \eta_j(t) \leq M[1 - \alpha_{ij}(t)] + 2[\phi_{ij} P_{ij}(t) + x_{ij} Q_{ij}(t) - (\phi_{ij}^2 + x_{ij}^2) \delta_{ij}(t)], \forall (i,j) \in E^* \end{cases} \quad (10)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij}(t) \\ 2Q_{ij}(t) \\ \delta_{ij}(t) - \eta_i(t) \end{matrix} \right\|_2 \leq \delta_{ij}(t) + \eta_i(t), \forall (i,j) \in E^* \quad (11)$$

式中： ϕ_{ij} 表示线路 ij 的导纳； $P_{jk}(t)$ 、 $P_{ij}(t)$ 分别表示 t 时刻线路 jk 和线路 ij 上的有功功率； x_{ij} 为线路 ij 的无功阻抗； $Q_{jk}(t)$ 、 $Q_{ij}(t)$ 分别表示 t 时刻线路 jk 和线路 ij 上的无功功率； M 为一个常数，用于限制电压差的范围。

式(12)、(13)为单一商品流生成树约束。式(14)是燃气轮机的爬坡约束。式(15)为WT和PV的运行控制函数，式(16)和式(17)是节点仅包含载荷的其他约束。

$$\sum_{j:i \rightarrow j} F_{ij}(t) + D_i(t) = \sum_{k:k \rightarrow i} F_{ki}(t), \forall i \in N \setminus \{0\}, (i,j) \in E^* \quad (12)$$

$$|F_{ij}(t)| \leq \alpha_{ij}(t) M, (i,j) \in E^* \quad (13)$$

$$0 \leq |P_i^M(t) - P_i^M(t-1)| \leq \Delta P_{Gi}(t), i \in N^M \quad (14)$$

$$V_i(t) = V_{0,i} - n_{qi} [Q_i^M(t) - Q_{0,i}^M], i \in N^M \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_i(t) = -[1 - s_i(t)] P_i^c(t), i \in N^{\text{pl}} \\ Q_i(t) = -Q_i^c(t), i \in N^{\text{pl}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} P_i(t) = P_i^{\text{DG}}(t) - [1 - s_i(t)] P_i^c(t), i \in N^{\text{DG}} \\ Q_i(t) = Q_i^{\text{DG}}(t) - Q_i^c(t), i \in N^{\text{DG}} \end{cases} \quad (17)$$

式中： $F_{ij}(t)$ 为 t 时刻节点 i 到节点 j 的商品流量； $D_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 的需求量； $F_{ki}(t)$ 为 t 时刻节点 k 流向节点 i 的商品流量； $\Delta P_{Gi}(t)$ 为 t 时刻节点 i 的爬坡限制； $P_i^c(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负载有功功率需求； $Q_i^c(t)$ 为 t 时刻节点 i 的负载无功功率需求； $P_i^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻分布式电源在节点 i 的有功功率输出； $Q_i^{\text{DG}}(t)$ 为 t 时刻分布式发电电源在节点 i 的无功功率输出； N^{DG} 为分布式发电节点集合； $P_i^M(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻的第 i 个MGT产生的有功功率； $V_i(t)$

为 t 时刻第 i 个节点的电压值； $V_{0,i}$ 为第 i 个节点的基准电压值； n_{qi} 为第 i 个节点下垂系数； $Q_{0,i}^M$ 为第 i 个节点的基准无功功率输出； N^P 表示载荷节点集合。

具有约束(2)–(17)的问题是一个可以用商业求解器求解全局最优解的混合整数二阶锥规划，在上述问题中需要求解的变量是 $P_i(t)$ 、 $Q_i(t)$ 、 $s_i(t)$ 和 $\alpha_{ij}(t)$ ，利用商业求解器求解该类型大规模整数规划问题是目前最普遍有效的解决方法。

1.3 一致性共识算法

所有的智能体都可以通过信息探索算法与它们的邻居交换信息来实现共识。智能体仅能获得它所控制节点的相关状态值，其他节点的信息需要通过与零初始值的通信来获得。本文采用共识算法设计了全局信息发现的通信律，由于这个问题中变量序列的谱半径小于1，且如果迭代矩阵的谱半径小于1，它将收敛于任何初值。节点 i 的信息探索过程记为

$$x_i^{k+1}=x_i^k+\sum_{j=1}^N a_{ij}(x_j^k-x_i^k) \tag{18}$$

式中： $i=1,2,\cdots,N$ ， $k\in\mathbf{N}$ ； x_i^0 是智能体 i 的初始状态； x_i^k 和 x_i^{k+1} 分别是智能体 i 在时刻 k 和 $k+1$ 处探索发现的信息，如果智能体 i 和 j 通过配电线路连接，则有 $0<a_{ij}<1$ ，否则， $a_{ij}=0$ 。

当遭遇极端事件时，部分代理可能受到损坏或通信中断，但本文采用的方法提高了系统实现灾后自愈的成功率。对于复杂的大规模DN，利用并行计算技术分解任务，实现DN自愈的全分布式DNR策略。

1.4 生成对抗网络技术

在每个时间段都需要对可再生能源和负荷进行准确的功率预测。然而，与短期预测相比，长期功率预测的精度并不高，这会直接降低规划结果的精确度。为了在滚动自适应规划中利用高精度预测数据，本文提出了一种基于历史短期预测数据的生成对抗网络(generative adversarial networks, GAN)数据分割方法来训练整个DN中可再生能源功率和负荷功率的准确预测数据，由此生成模型。GAN是一种基于深度学习体系结构的生成模型，它主要由2个子结构组成，即生成器G

和鉴别器D。生成器G负责合成数据，鉴别器D负责识别数据是真实的还是合成的。因此，GAN训练可以表示为一个最小–最大问题：

$$\min_{\theta_G} \max_{\theta_D} \mathbb{E}_{x\sim P_{rd}}[\log D(x)]+\mathbb{E}_{z\sim P_{gd}}\{\log[1-G(z)]\} \tag{19}$$

式中： $\mathbb{E}$ 为期望函数； θ_G 和 θ_D 分别为G的映射 $G(\cdot)$ 和D的映射 $D(\cdot)$ 的参数； P_{rd} 和 P_{gd} 分别表示实分布和高斯分布。 θ_D 的最大值可以度量合成概率分布与实分布之间的差值，而 θ_G 的最小值可以使合成概率分布尽可能接近实分布。

2 案例研究

使用一个改进的IEEE 33节点系统^[28-30]来验证所提出的方法，图1为带有光伏和风力涡轮机IEEE-33系统。

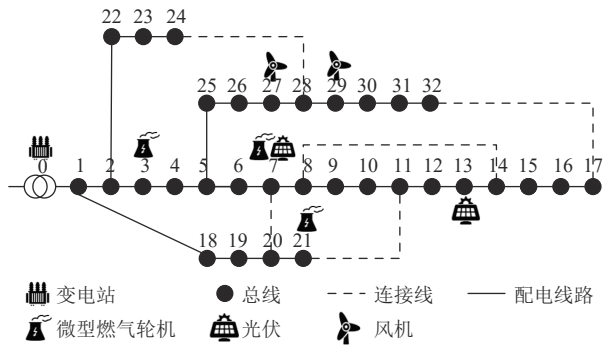


图1 带有光伏和风力涡轮机IEEE-33系统
Fig. 1 IEEE-33 system with photovoltaic and wind turbine

改进的33节点系统参考自文献[28-30]，这是一个具有孤岛运行能力的微电网系统，具体参数如表1所示。

表1 与测试系统相关的参数
Tab. 1 Parameters related to the testing system

参数	数值	参数	数值
C^G /(美元/MW)	100	$\eta_i, \bar{\eta}_i$	0.95, 1.05
C^M /(美元/MW)	25	$P_i^M, \bar{P}_i^M$	0, 2
C^{Loss} /(美元/MW)	130	$Q_i^M, \bar{Q}_i^M$	0, 1
C^h /(美元/MW)	2 000	n_{qi}	2×10^{-5}

对于测试示例，负荷数据的时间序列取自文献[31]，太阳能和风能的时间序列取自文献[32]，同时假设每个分支节点都安装了远程控制交换机^[33]。微型燃气轮机安装在节点4、8和22，控制方式均以下垂控制为主，最大有功功率为2 MW，

最大无功功率为 $1 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。假设光伏设备安装在节点 8、14，风力涡轮机安装在节点 28 和 30，每台风光发电机组的最大装机容量为 750 kW 。此外，光伏和风力发电机都采用恒功率因数控制，即取值为 1(仅产生有功功率)。

图 2 为配电网初始正常运行状态下的网络拓扑及节点电压区间分布情况，可以看出在初始无故障情况下，拓扑重构过程中能够保证所有母线和变电所节点的连通，pandapower 仿真电压范围满足电压约束。图 3 为常规单步法和提前 4 步预测法的网损指标对比。可以看出，本文方法的网损要低于单步优化算法。这是因为本文方法使用了滚动性的思想，通过使用有限次数切换动作的历史数据来生成预测性数据，以在整个优化时间域内获得更高的优化性能。

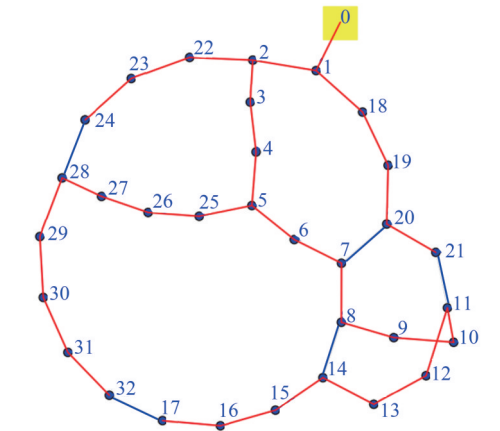


图 2 正常运行状态

Fig. 2 Normal operation status

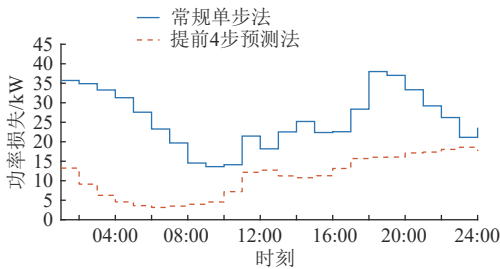


图 3 常规单步法和提前 4 步预测法的网损指标对比

Fig. 3 Comparison of network loss indicators between conventional one-step method and advanced 4-step prediction method

为了验证本文方法对正常状态和故障状态自适应运行的效用，分别对正常运行、 $N-1$ 线路故

障(单线故障)和 $N-2$ 线路故障(两线故障)下的配网运行调度进行了仿真。为了更清楚地呈现结果，以一天 24 h 为例进行模拟，优化时间间隔为 1 h ，预测步长设置为 4，并且切换动作的次数被限制为 5。

图 4 展示了 $N-1$ 故障场景下自愈恢复的结果，红色线条表示带电线路，而蓝色线条表示开关操作闭合的线路，蓝色叉号表示开关操作断开的线路，下同。当线路 1—18 出现故障时，线路 1—18 上的开关将断开。采用本文方法得到燃气轮机机组的出力 and 开关动作方案，以生成自愈恢复调度指令。在该指令中，开关 13—14 断开，8—14 以及 11—21 闭合。从图 4 可以看出，按生成的自愈恢复指令操作后，系统满足潮流方程，并且每个母线节点的电压都在约束范围内。

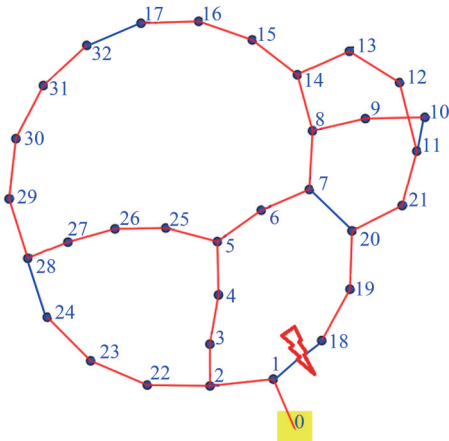


图 4 一条线路故障下的分布式网络状态

Fig. 4 Distributed network state under a line fault

图 5 展现了 $N-2$ 故障场景下的自愈恢复结果。当线路 18—19 和 10—11 都出现故障时，采用本文方法得到燃气轮机的出力 and 开关动作方案，以生成自愈恢复调度指令。在该指令中只需闭合 8—14，11—21。按生成的自愈恢复指令操作后，系统满足潮流方程，并且每个母线节点的电压都在约束范围内。在这种情况下，需要操作的开关在配网中位置较为分散，当通信中断时，区域代理可能无法准确获取配网状态信息，导致无法生成可行的恢复策略，而采用本文的方法能够在任意代理上获得全局状态信息，实现广域内开关和机组协同参与自愈恢复。

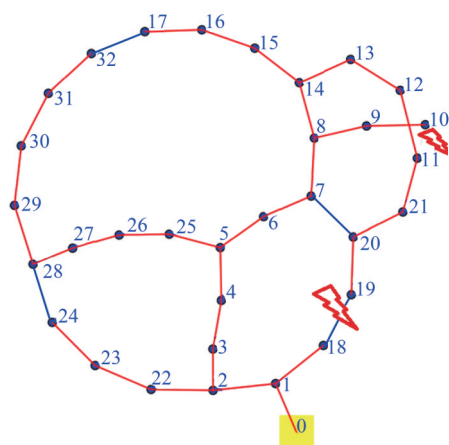


图5 2条线路故障下的分布式网络状态

Fig. 5 Distributed network status under two line faults

3 结论

1) 在无需额外的外部触发信号情况下, 所提方法能实现正常状态、 $N-1$ 线故障和 $N-2$ 线故障下自动重构自愈, 保证电网经济优化运行。

2) 利用生成对抗网络技术, 结合电网运行历史数据, 对电网运行数据进行预测, 可有效提升电网预测精度。

参考文献

- [1] 李峰, 孙波, 王轩, 等. 基于Petri网的含分布式光伏配电网故障诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2020(8): 92-96.
LI F, SUN B, WANG X, et al. Fault diagnosis method for distributed photovoltaic distribution network based on petri nets[J]. Techniques of Automation and Applications, 2020(8): 92-96.
- [2] 刘洪波, 刘坤诚, 盖雪扬, 等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 151-161.
LIU H B, LIU S C, GAI X Y, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 151-161.
- [3] 刘建伟, 李学斌, 刘晓鸥. 有源配电网中分布式电源接入与储能配置[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 476-484.
LIU J W, LI X B, LIU X O. Distributed power access and energy storage configuration in active distribution network[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 476-484.

- [4] 王艺, 王宾, 刘阳, 等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 164-172.
WANG Y, WANG B, LIU Y, et al. Optimization strategy for distribution network reconfiguration considering the dynamic behavior of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 164-172.
- [5] 周鹏. 含分布式电源并网特性的配电网重构策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 34-40.
ZHOU P. Reconfiguration strategy of distribution network considering characteristics of grid-connected distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 34-40.
- [6] WANG H J, PAN J S, NGUYEN T T, et al. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on parallel slime mould algorithm[J]. Energy, 2022, 244: 123011.
- [7] 吉兴全, 连承宇, 张玉敏, 等. 基于智能软开关的三相不平衡配电网动态重构策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(5): 111-118.
JI X Q, LIAN C Y, ZHANG Y M, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks based on SOP[J]. Smart Power, 2023, 51(5): 111-118.
- [8] 张玉敏, 孙鹏凯, 叶平峰, 等. 基于CNN的配电网快速重构方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(11): 112-118.
ZHANG Y M, SUN P K, YE P F, et al. Fast reconfiguration method of distribution network of based on convolutional neural network[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 112-118.
- [9] 童晓阳, 张绍迅. 基于灰色关联度的配电网故障区段定位与类型识别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 113-118, 145.
TONG X Y, ZHANG S X. Grey relational degree based fault section location and type recognition method for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 113-118, 145.
- [10] KIANMEHR E, NIKKHAH S, VAHIDINASAB V, et al. A resilience-based architecture for joint distributed energy resources allocation and hourly network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5444-5455.
- [11] ARULPRAKASAM S, MUTHUSAMY S. Reconfiguration of distribution networks using rain-fall optimization with non-dominated sorting[J]. Applied Soft Computing, 2022, 115: 108200.

- [12] 孙元博, 张承学, 胡志坚. 地区配电网重构与故障恢复问题[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3366-3371.
SUN Y B, ZHANG C X, HU Z J. Reconfiguration and fault restoration of regional distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3366-3371.
- [13] 王晓, 何悦星, 李立波, 等. 分布式光伏电源接入的配电网馈线重构技术[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(7): 94-99.
WANG X, HE Y X, LI L B, et al. Distribution network reconfiguration technology based on distributed photovoltaic power supply access[J]. Techniques of Automation and Applications, 2019, 38(7): 94-99.
- [14] FU Y Y, CHIANG H D. Toward optimal multiperiod network reconfiguration for increasing the hosting capacity of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2294-2304.
- [15] GAO H, MA W, HE S, et al. Time-segmented multi-level reconfiguration in distribution network: a novel cloud-edge collaboration framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 3319-3322.
- [16] ZHANG Y, QIAN T, TANG W. Buildings-to-distribution-network integration considering power transformer loading capability and distribution network reconfiguration[J]. Energy, 2022, 244: 123104.
- [17] ARANDIAN B, HOOSHMAND R A, GHOLIPOUR E. Decreasing activity cost of a distribution system company by reconfiguration and power generation control of DGs based on shuffled frog leaping algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 48-55.
- [18] CHIDANANDAPPA R, ANANTHAPADMANABHA T, RANJITH H C. Genetic algorithm based network reconfiguration in distribution systems with multiple DGs for time varying loads[J]. Procedia Technology, 2015, 21: 460-467.
- [19] SANCHES D S, LIMA T W, SANTOS A C, et al. Node-depth encoding with recombination for multi-objective evolutionary algorithm to solve loss reduction problem in large-scale distribution systems[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, USA:IEEE, 2012: 1-8.
- [20] 张晋铭, 欧阳森, 辛曦, 等. 高渗透率分布式电源影响下配电网极限线损计算方法[J]. 广东电力, 2023, 36(4): 21-31.
ZHANG J M, OUYANG S, XIN X, et al. Calculation method of limit line loss of distribution network under influence of high-penetration distributed generation[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(4): 21-31.
- [21] 刘志勇, 曾庆彬, 吴晗. 高比例新能源接入的农村配电网网架多目标协同规划方法[J]. 广东电力, 2023, 36(9): 34-42.
LIU Z Y, ZENG Q B, WU H. Multi-objective collaborative planning method for rural distribution network grid with high proportion of new energy[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(9): 34-42.
- [22] 杨婧颖, 王武林, 张明敏, 等. 考虑分布式光伏和储能参与的配电网电压分层控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 111-120.
YANG J Y, WANG W L, ZHANG M M, et al. Voltage hierarchical control method of distribution network considering distributed photovoltaic and energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 111-120.
- [23] LI L L, XIONG J L, TSENG M L, et al. Using multi-objective sparrow search algorithm to establish active distribution network dynamic reconfiguration integrated optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 193: 116445.
- [24] JAFAR-NOWDEH A, BABANEZHAD M, ARABI-NOWDEH S, et al. Meta-heuristic matrix moth-flame algorithm for optimal reconfiguration of distribution networks and placement of solar and wind renewable sources considering reliability[J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 20: 101118.
- [25] ZHAO G, LIU J, LIU S, et al. Control strategy based on the flexible multi-state switch for maximum consumption of distributed generations in distribution network[J]. Applied Sciences, 2019, 9(14): 2871.
- [26] AJOULABADI A, RAVADANEGH S N, BEHNAM MOHAMMADI-IVATLOO. Flexible scheduling of reconfigurable microgrid-based distribution networks considering demand response program[J]. Energy, 2020, 196: 117024.
- [27] ISLAM M R, LU H, HOSSAIN M J, et al. Mitigating unbalance using distributed network reconfiguration techniques in distributed power generation grids with services for electric vehicles: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117932.
- [28] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

- [29] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification (parts I, II) [EB/OL]. (2012-12-02)[2023-08-16]. <https://arxiv.org/abs/1204.4865v4>.
- [30] XU X, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Maximum loadability of islanded microgrids with renewable energy generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 4696-4705.
- [31] 朱彦名, 徐潇源, 严正, 等. 面向电力物联网的含可再生能源配电网运行展望[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 176-187.
- ZHU Y M, XU X Y, YAN Z, et al. Prospect of renewable energy integrated distribution network operation in the power Internet of Things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 176-187.
- [32] PFENNINGER S, STAFFELL I. Long-term patterns of European PV output using 30 years of validated hourly reanalysis and satellite data[J]. Energy, 2016, 114: 1251-1265.
- [33] LEI S, CHEN C, SONG Y, et al. Radiality constraints for resilient reconfiguration of distribution

systems: formulation and application to microgrid formation[EB/OL]. (2019-08-02)[2023-08-16]. <https://arxiv.org/abs/1907.04951v1>.

收稿日期: 2023-09-14。

修回日期: 2023-12-25。

作者简介:



吴任博

吴任博(1983), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统及其自动化技术研究, 15876510818@163.com;



黄奕俊

黄奕俊(1978), 男, 硕士, 工程师, 主要从事继电保护与自动化控制方面研究, dickwang78@126.com。

(责任编辑 辛培裕)