

考虑负荷需求响应以及 VSC 控制方式的 交直流混联配电网故障恢复

刘青¹, 朱维佳¹, 马天祥²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;
2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北省石家庄市 050021)

Fault Recovery of AC/DC Hybrid Distribution Network Considering Load Demand Response and VSC Control Mode

LIU Qing¹, ZHU Weijia¹, MA Tianxiang²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, Hebei Province, China)

摘要: 为提高交直流混联系统故障恢复的高效性以及可靠性。针对风光等分布式电源以及负荷存在的随机性问题, 考虑 VSC 在交直流混联系统故障恢复时发挥的作用, 构建含风光储联合系统和考虑到需求响应的可控负荷的交直流混联配电网模型。故障发生后首先通过改变 VSC 控制方式利用联合系统出力形成孤岛对重要负荷进行恢复。然后运用引入扰动因子以及混沌映射的二进制蚁狮优化算法得到考虑到 VSC 控制方式、风光不确定性以及负荷需求响应的综合恢复策略。最后对 49 节点的交直流混联配电网进行仿真分析。仿真结果表明, 所提策略可快速得到不同时刻下交直流混联配电网的故障恢复方案, 在保障重要负荷不断电的基础上恢复尽量多的负荷, 与其他方案对比验证了所提恢复策略的优越性。

关键词: 交直流混合配电网; 故障恢复; 孤岛划分; 分布式储能; 电压源型换流器

Abstract: In this paper, we aim to improve the efficiency and reliability of fault recovery in AC/DC hybrid systems. Considering the stochastic nature of distributed power sources such as wind and photovoltaic and loads, as well as the role of VSC in AC/DC hybrid system fault recovery, an AC/DC hybrid distribution network model is constructed. This model incorporates a combined system of wind, photovoltaic and storage, along with controllable loads that consider demand response. After the occurrence of a fault, the important load is first restored by chan-

ging the VSC control mode and utilizing the joint system output to form an island. Then, a binary ant lion optimization algorithm incorporating disturbance factors and chaotic mapping is employed to obtain a comprehensive recovery strategy that takes into account the VSC control method and the uncertainties associated with wind, photovoltaic, and load demand response. Finally, a 49-node AC/DC hybrid distribution network is selected for case study. The simulation results indicate that the proposed strategy enables rapid acquisition of fault recovery plans for AC/DC hybrid distribution networks at different moments, verifying the superiority of the proposed recovery strategy.

Keywords: AC/DC hybrid distribution network; fault recovery; island partition; distributed energy storage; voltage source converter.

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0187

0 引言

配电网发生故障后, 通过操作不同联络或分段开关的开断状态来进行故障恢复。近年来, 直流输电技术飞速发展, 多种直流设备接入配电网, 直流负荷被广泛应用。直流系统具有易控、环保的优点, 其电能质量参数以及输电容量参数也比传统交流配电网优秀。交直流混联配电网在传统交流电网的基础上吸纳了直流配电网的优点, 同时具有两种配电网的优势, 交流及直流电网互为支撑, 大大提高了能源转换和利用效率。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(kj2021-003)。
Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(kj2021-003).

配电网故障恢复问题已被广泛研究。文献[1]建立含分布式电源的配电网故障恢复模型,考虑孤岛与主网恢复之间的相互影响。文献[2]考虑了光伏以及负荷的时变性,建立双层规划模型。文献[3]通过免疫记忆模型构建预想事故集,在高风险故障时利用建立好的恢复方案恢复。针对配电网故障恢复策略的求解问题。当前多运用遗传算法、灰狼算法、粒子群算法等智能优化方法。目前多着眼于算法的改进与融合从而实现算法性能的优化。文献[4]在蚁群算法加入免疫机制,解决算法不易收敛、易陷入局部最优的问题。文献[5]将tent映射、合作竞争机制引入灰狼算法,提高了算法的迭代和收敛速度。

随着电网的发展,可控负荷、电动汽车等可调度资源逐步接入配电网,配电网的恢复策略由此变得更加复杂。文献[6]建立故障与抢修结合的双层模型,利用分布式电源和应急电车等资源设计恢复策略。文献[7]将公共充电站、电动公交车站等用户视作可调度资源,并将这些可调度资源和可控负荷一起纳入恢复模型中。文献[8]建立充换放储一体站,并将其纳入故障恢复的策略中。也有将电力系统与其他系统耦合起来,以提高配电网的韧性。文献[9]建立电力与通信系统耦合模型,考虑通信恢复对电力系统恢复的影响,恢复策略综合考虑电气之间的耦合。文献[10]将电-气系统互联,通过调整故障期间的互联计划降低失电负荷量。

交直流混联配电网作为配电网的重要发展趋势,其网架结构和故障恢复相对传统交流电网更为复杂。交直流混合配电网中,可以通过改变换流器的状态来进行故障恢复。文献[11]比较了交直流混合配电网与传统交流配电网在故障恢复方面的各种差异,但未考虑可调度资源对恢复的影响。文献[12]建立故障模式后果分析表,根据不同的故障情况选定合适的VSC控制策略完成故障恢复。文献[13]通过控制多端SOP形成孤岛来恢复失电负荷。文献[14]在文献[11]的基础上考虑到分布式储能对恢复策略的影响,构建了含分布式储能的交直流混联配电网负荷恢复模型,有效的提高了供电可靠性。但上述文献均未考虑到负荷的需求响应以及负荷恢复需求的时变性对故障恢复的影响,也没有考虑到配电网中的孤岛恢复与主网恢复之间的配合。

综上所述,本文提出一种考虑负荷需求响应以及VSC控制方式的交直流混联配电网故障恢复策略。建立风光储联合系统模型和考虑负荷需求响应的可控负荷模型。故障发生时首先通过改变相应VSC的控制方式形成孤岛,根据负荷不同时刻的权重进行恢复,权重高的负荷将优先被恢复,在孤岛容量不够时进行需求响应,通过削减可控负荷满足孤岛运行约束。再将负荷失电量最小、开关动作次数最少综合转换为目标函数。综合孤岛与主网进行恢复,为了提高求解效率,运用引入扰动因子以及混沌映射策略的蚁狮优化算法求解模型。算例表明,在交直流混联配电网发生故障后,能得到快速、可靠的最优方案。仿真结果验证了所得恢复方案的有效性。

1 交直流混联配电网模型

1.1 交直流混联配电网基本结构

交直流混联配电网以交流网络为主体,将直流负荷以及直流电源所在区域划分为直流网络,然后通过VSC将其接入主体交流网络^[1]。这样可以提高能量转换效率和电能质量。

如图1所示。交流网络与外网连接获得电能,直流网络则通过VSC与交流网络连接。VSC不仅控制注入系统的功率,还起到了隔离的作用。

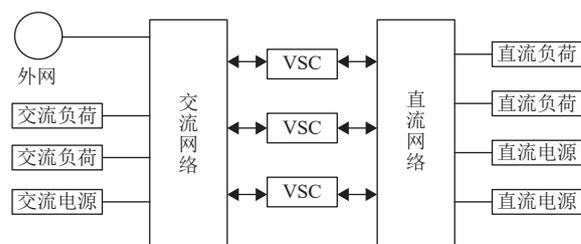


图1 交直流混联配电网

Fig. 1 AC/DC hybrid distribution network

1.2 VSC调节方式

对于交直流混合网络来说,VSC换流器可以从有功/无功功率、交流/直流电压等变量中选择其中两个变量进行控制^[12]。

具体来说,有以下3种控制方式:

- 1) $V_{dc}-Q$ 控制。控制直流电压和无功功率,维持直流线路电压恒定;
- 2) $P-Q$ 控制。控制有功功率和无功功率,与交流侧进行功率交换;
- 3) $V_{ac}-\theta$ 控制。控制交流电压,向无源交流

网络提供电压支撑和频率稳定。

配电网在正常运行条件以及故障恢复条件下，VSC 分别采用不同的运行模式。正常运行时，VSC 站采用 $V_{dc}-Q$ 控制。交流侧发生故障时，交流侧失电负荷构成一个无源交流网络。此时 VSC 承担着失联侧交流网的功率传输、电压支撑和频率稳定的作用。充当无源交流网的电源，由 $V_{dc}-Q$ 切换成 $V_{ac}-\theta$ 控制。

1.3 风光储联合系统模型

1) 光伏出力模型。

光照强度有随机性。而光电的出力主要受光照强度的影响^[15]，因此光电的出力与太阳辐射强度的关系为：

$$P_{PV} = \eta RS \quad (1)$$

式中： P_{PV} 为 PVG 出力预测值； η 为光电转换效率； S 为辐射面积； R 为辐射强度，其服从 Beta 分布，概率密度如下：

$$f(R) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{R}{R_{max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{R}{R_{max}}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

2) 风电出力模型。

风电的出力主要受风速影响^[16]，其出力关系式如下式 (3)：

$$P_{WT} = \begin{cases} b + av, v \leq v_{in} \text{ 或 } v \geq v_{out} \\ P_N, v_{in} \leq v \leq v_N \\ 0, v_N \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (3)$$

式中： P_{WT} 为风电出力预测值； P_N 为风电的额定容量； v_{in} 、 v_{out} 以及 v_N 分别为风机的切入、切出以及额定风速； v 为实际风速，其概率分布可用威布尔函数描述^[16]：

$$F(v) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k \right] \quad (4)$$

3) 储能出力模型。

储能系统充放电模型如下列公式所示：

$$\begin{cases} |P_{b,t}| \leq P_{cmax} \\ |P_{b,t}| \leq P_{fmax} \\ E_{min} \leq E_t - P_{b,t}h \leq E_{max} \\ E_{t+1} = E_t - P_{b,t}h \end{cases} \quad (5)$$

式中： $P_{b,t}$ 为 t 时刻储能的充/放电功率， $P_{b,t} < 0$ 为储能充电， $P_{b,t} > 0$ 为储能放电； P_{cmax} 、 P_{fmax} 分别为储能的充、放电功率； E_t 为 t 时刻储能的实际电量； E_{max} 、 E_{min} 分别为储能装置的最大、最小容量； h 为充放电时长。

4) 风光储联合系统模型。

为了抑制由分布式电源受环境影响带来的出力不确定，将其与储能相结合形成联合系统^[16]。不仅保证了故障恢复中孤岛内的源荷平衡，还减少了资源的浪费。根据不同时刻风电、光伏及储能的出力，得到风光储联合系统某时刻的联合总出力为：

$$P_{c,t} = P_{b,t} + P_{d,t} \quad (6)$$

式中： $P_{c,t}$ 为 t 时刻风光储联合系统的出力； $P_{b,t}$ 为 t 时刻储能的充、放电功率； $P_{d,t}$ 为 t 时刻风电或光伏的出力。

1.4 权重负荷模型

1.4.1 时变负荷

配电网中存在不同行业的负荷。根据行业负荷的分类，可以将配电网中各节点的负荷划分为政府、医疗负荷、商业负荷和居民负荷这 3 类^[16]。不同行业的负荷随时间变化的电量可由其典型日负荷曲线求得

$$L_i(t) = \int_t^{t+1} f_i(x)dx, t = 1, 2, \dots, 24 \quad (7)$$

式中： L_i 为节点 i 在 t 时刻的电量； $f_i(x)$ 为典型负荷日变化曲线。不同行业节点负荷的典型日负荷曲线如附录图 A1 所示、典型日负荷需求数据如附录表 A1 所示。

1.4.2 权重负荷系数

电力负荷可由失电时造成的损失划分为 3 种不同等级的负荷。不同等级负荷恢复时负荷重要程度不同。由于负荷需求存在种类、时刻上的差异，故本文结合负荷等级和不同时刻、不同行业负荷的电量，本文定义权重负荷系数 $R_{i,t}$ 为

$$R_{i,t} = D_t \omega_t L_i(t) \quad (8)$$

式中： $R_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的权重系数； D_t 为 t 时刻的负荷恢复系数， $D_t \in [1, 10]$ ，一级负荷的恢复系数设为为最大值，其他等级负荷根据故障时刻的重要程度设定。例如：早晚发生故障时，居民负荷比较重要，所以将居民负荷设为 6 商业负荷为 1；而工作时间发生故障，政府、医疗负荷比较重要，将政府、医疗负荷设为 6 居民负荷设为 1； ω_t 为等级系数，对于一、二、三级负荷， ω_t 分别取 1、0.1、0.01； $L_i(t)$ 为节点 i 在 t 时刻的用电量，由 1.4.1 节得出。

1.5 负荷需求响应

配电网存在可控负荷用户。供电单位可对可

控负荷用户进行控制以满足配网紧急或故障情况下的运行约束。因此，建立可控负荷模型为：

$$P_{icut,t} = \alpha_{i,t} P_{load,i,t} \quad (9)$$

式中： $P_{icut,t}$ 为节点*i*在*t*时刻的可控量； $\alpha_{i,t}$ 为节点*i*在*t*时刻的可控系数， $\alpha_{i,t} \in [0, 1]$ ； $P_{load,i,t}$ 为负荷*i*在*t*时刻的负荷电量。

激励型响应通过负荷的直接控制使负荷主动参与削峰填谷，实现综合资源优化运行^[17]。通过对电力系统中的可控负荷进行削减管理，在故障或紧急期间使负荷的用电量曲线小于风光储联合系统的出力曲线并最大程度保持趋势的一致性^[17]。用响应方差*r*来代表此趋势的偏离：

$$r = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{c,t} - P_{load,t})^2 \quad (10)$$

式中：*T*为孤岛数量； $P_{c,t}$ 为故障时刻*t*孤岛内风光储联合系统的出力； $P_{load,t}$ 为故障时刻*t*孤岛内负荷的需求。在需求响应时应考虑*r*为最小而进行可控负荷削减。

2 孤岛划分

2.1 孤岛划分模型

孤岛划分是为了在故障后通过配电网中的黑启动电源快速向失电负荷供电以保证供电可靠性，因此孤岛划分目标函数如下：

$$\max f_i = \sum_{i \in N} R_{i,t} v_{i,t} \quad (11)$$

式中：*N*为所有节点的集合； $R_{i,t}$ 为*i*节点在*t*时刻的权重系数； $v_{i,t}$ 为*i*节点*t*时刻的供电状态， $v_{i,t} = 0$ 表明节点处于失电状态， $v_{i,t} = 1$ 表明节点处于供电状态。

2.2 约束条件

1) 孤岛内功率约束。孤岛内所有能源的出力必须大于负荷功率、线路损耗以及换流器损耗之和。

$$\sum_{i=1}^G P_{load,i} + P_{loss} + P_{vsc} \leq \sum P_C \quad (12)$$

式中：*G*为孤岛内的节点集合； $P_{load,i}$ 表示节点*i*在孤岛时段的用电量； P_{loss} 表示孤岛网损，包括交流线路网损和直流线路损耗； P_{vsc} 表示孤岛内的VSC站损耗； $\sum P_C$ 为故障时段孤岛内风光储联合系统的出力之和，由1.3节计算可得。

2) 系统潮流约束。

交流网络潮流约束如下列公式所示：

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (13)$$

式中：*N*为交流网络节点集合； U_i 、 U_j 分别为交流网络中第*i*个节点以及第*j*个节点的电压幅值； P_i 、 Q_i 分别表示第*i*个节点流入的有功、无功功率； G_{ij} 、 B_{ij} 以及 δ_{ij} 分别为首末节点分别为*i*、*j*的线路的电导、电纳和电压相角差。

直流网络潮流约束下列公式所示：

$$P_i = \sum_{j=1}^M B_{ij} \theta_j \quad (14)$$

式中：*M*为直流网络的节点集合； P_i 为直流网络中第*i*个节点的注入功率； B_{ij} 为直流网络中第*i*个以及第*j*个节点之间线路的电导； θ_j 为相角差。

3) 换流站约束。

$$\begin{cases} (P^{VSC})^2 + (Q^{VSC})^2 \leq (S_{max}^{VSC})^2 \\ -P_{max}^{VSC} \leq P^{VSC} \leq P_{max}^{VSC} \\ -Q_{max}^{VSC} \leq Q^{VSC} \leq Q_{max}^{VSC} \end{cases} \quad (15)$$

式中： P^{VSC} 、 Q^{VSC} 分别为VSC的有功、无功功率； S_{max}^{VSC} 为VSC的载流量上限； P_{max}^{VSC} 为VSC的功率传输上限； Q_{max}^{VSC} 为VSC的无功调节上限。

4) 节点电压约束。

$$U_{i,min} \leq U_i \leq U_{i,max} \quad (16)$$

式中： U_i 为节点*i*的电压； $U_{i,max}$ 、 $U_{i,min}$ 分别为节点*i*的电压上、下限。

5) 支路功率约束。

$$-P_{r,max} \leq P_r \leq P_{r,max} \quad (17)$$

式中： P_r 为第*r*条线路的输送功率； $P_{r,max}$ 为第*r*条线路的功率输送上限。

6) 辐射状约束。

$$g \in G \quad (18)$$

式中：*g*为配电网拓扑；*G*为配电网辐射状拓扑集合。

2.3 孤岛划分流程

交直流混合配电网故障时，可以由网络中的联合储能系统形成不同的孤岛。对配电网中的重要负荷进行恢复，完成自愈。本文孤岛划分模型考虑不同类型负荷需求的不确定性，保证故障时

刻需求度高的负荷的恢复供电，通过需求响应维持源荷两侧的出力平衡以及孤岛安全运行。交直流混合孤岛划分的具体流程如下。

- 1) 数据初始化：输入交直流混联配电网拓扑，节点等级、负荷，故障时刻、位置等。
- 2) 计算故障时刻的权重负荷系数 $R_{i,t}$ 以及风光储联合系统出力。
- 3) 根据故障情况改变 VSC 运行状态。
- 4) 采用广度优先法划分孤岛。检测孤岛范围，若孤岛范围存在重合现象，则组合重合孤岛。
- 5) 检索所有的重要负荷是否都在孤岛内，若有重要负荷失电，则将此负荷通过 DFS 接入最近孤岛；判断孤岛是否满足运行约束，若满足则转至步骤 7)，否则转至步骤 6)。
- 6) 进行需求响应，调节孤岛内的可控负荷，直至满足运行约束后执行步骤 7)；若达到可控负荷的最大调节量之后仍未满足运行条件，则缩小孤岛范围直至满足运行约束，则执行步骤 7)。
- 7) 得到孤岛划分方案。

3 负荷恢复策略

交直流配电网故障发生后，通过调控风光荷储联合系统以及改变 VSC 控制方式形成孤岛保证重要负荷恢复供电。在已经形成孤岛的基础上，利用主网转供，通过操作不同联络或分段开关的开断状态由主网对仍未恢复供电的负荷进行下一步恢复。运用引入扰动因子以及混沌映射策略的蚁狮优化算法得到最优的交直流混合配电网的故障恢复方案。

3.1 负荷恢复目标函数

综合考虑故障恢复的满意度，将故障恢复后仍失电负荷总量、开关操作次数这两个目标转化为单目标优化进行求解。负荷恢复的目标函数为

$$\min f_i = \tau_1 f_1 + \tau_2 f_2 \quad (19)$$

$$\begin{cases} f_1 = \sum_{i=1}^N R_{i,t} P_{load,i,t} v_{i,t} \\ f_2 = \sum_{b=1}^M \rho_b \end{cases}$$

式中： f_1 为失电负荷总量，其中 N 为交流或直流节点总数； $R_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的权重负荷系数； $P_{load,i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷总电量； $v_{i,t}$ 为节点

i 在 t 时刻的供电状态， $v_{i,t} = 0$ 表示节点 i 在 t 时刻处于供电状态， $v_{i,t} = 1$ 表示节点 i 在 t 时刻处于失电状态； f_2 为总开关操作次数； M 为开关数之和，包括交流开关和直流开关； ρ_b 为交流或直流开关 b 的操作状态， $\rho_b = 1$ 表示开关动作了， $\rho_b = 0$ 表示开关没动作；在均衡各个目标的基础上为了突出失电负荷总量最小，本文设置目标权重 τ ，其中 $\tau_1 = 0.8$ ， $\tau_2 = 0.2$ 。

3.2 改进的二进制蚁狮优化算法

3.2.1 二进制蚁狮优化算法

二进制蚁狮算法将蚂蚁与蚁狮个体的各个维度取值限制为 0 或 1，按公式 (20) 对蚂蚁位置进行更新：

$$X(t+1) = \text{crossover}(L_{rs}(t), L_e(t)) \quad (20)$$

式中： $X(t+1)$ 为 $t+1$ 代的蚂蚁个体； crossover 通过轮盘赌选择随机行走子代解 $L_{rs}(t)$ 、 $L_e(t)$ 。该交叉操作在各个维度的实现如下式所示：

$$X_d(t+1) = \begin{cases} X_{rs}^d(t), r > 0.5 \\ X_e^d(t), r \leq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

式中： $X_{rs}^d(t)$ 为蚂蚁第 t 代解 $L_{rs}(t)$ 第 d 维的数据； $X_e^d(t)$ 为 $X_e(t)$ 第 d 维的数据； r 为 0~1 之间的随机数，蚂蚁各个维度的计算如下式：

$$X_{ant}^d = \begin{cases} X_{antlion}^d, r > r_0 \\ |1 - X_{antlion}^d|, r \leq r_0 \end{cases} \quad (22)$$

式中： X_{ant}^d 为 $L_{rs}(t)$ 或 $L_e(t)$ 的第 d 维数据； $X_{antlion}^d$ 为父代蚁狮的第 d 维数据； r_0 为选择因子，其值随着迭代次数 t 的增加递减：

$$r_0 = 0.9 - \frac{0.9(t-1)}{T-1} \quad (23)$$

式中： t 为当前迭代次数，而 T 为最大迭代次数。

3.2.2 改进的二进制蚁狮算法

原始二进制蚁狮算法收敛度低、易陷入局部最优。本文引入干扰因子、混沌映射，使算法在搜索效率以及收敛度方面均得到改进。

1) 干扰因子 q 。

干扰因子影响蚂蚁的随机行走，使行走范围从初期到后期由大到小过渡，实现局部与全局搜索的平衡。干扰因子 q 定义如下：

$$q = \left[\left(-\alpha \times \frac{t}{T} \right)^5 + 1 \right] \times \beta \quad (24)$$

式中： t 、 T 分别是当前以及最大迭代次数；当

$\alpha = 10$, $\beta = 0.15$ 时寻优效果最好。

2) 混沌映射。

轮盘赌机制给算法提供了一定的变化性，但也提高了适应度较差的蚁狮被选择的概率。

混沌映射如下：

$$l_{n+1} = 4 \times l_n(1 - l_n) \quad (25)$$

式中： l_n 为0~1之间的随机值，将crossover与混沌映射结合完成混沌搜索。

3.3 约束条件

约束条件同2.2.2节，在此不再赘述。

3.4 故障恢复策略

孤岛划分后，本文利用改进的二进制蚁狮算法进行恢复重构，具体步骤如下：

- 1) 对孤岛划分后的具体配电网数据进行更新。
- 2) 初始化算法的参数。
- 3) 初始化种群。
- 4) 进入迭代寻优，对蚁狮种群排序得到精英蚁狮。
- 5) 通过混沌映射与轮盘赌结合父代蚁狮，蚂蚁在选定蚁狮周围进行随机行走。
- 6) 蚁狮捕食蚂蚁。
- 7) 更新种群以及精英蚁狮。

8) 判断是否达到最大迭代次数，若是则已达到最优解，转至步骤9)。若否，则认为还未达到最优解。返回步骤5)重新迭代。

9) 达到最优解，输出最优故障恢复方案以及相应的VSC控制方案。

4 算例分析

4.1 算例参数设置

以接入风光储联合系统的49节点交直流混联配电网系统为算例，网络拓扑如图2所示。黑色节点为交流节点，白色节点为直流节点。直流节点33~36、37~41、42~45、46~49分别通过VSC接入交流系统。正常运行时，外网通过0节点向配电网进行供电，为了有效调节直流侧电压，4个VSC均采用 $V_{dc}-Q$ 控制。在节点39、43处分别接入光储系统，节点35、48处分别接入风光联合储能系统。系统的额定电压为12.66 kV。各节点等级参数、类型参数、可控参数分别如表1—3所示。风光储联合系统的具体参数设置如表4。

采用改进的二进制蚁狮算法进行故障恢复，算法参数设置如下：蚁狮维数为56，蚁狮以及蚂蚁个数为20，最大迭代次数为50。使用BALO、BPSO算法与本文所提改进的二进制蚁狮算法进行50次重复实验对比，算法性能对比如表5。

相较于成熟的BPSO算法，LBALO算法的最佳适应度要小5.14并且达到最佳适应度的平均迭代次数要少30次；相对于原始的BALO算法，LBALO算法不仅在收敛度上有很大改进，还在收敛速度上有较大改善；在搜索效率上，LBALO算法经过32.82 s完成搜索，大大提高了算法的搜索效率。改进的二进制蚁狮算法能较好的跳出局

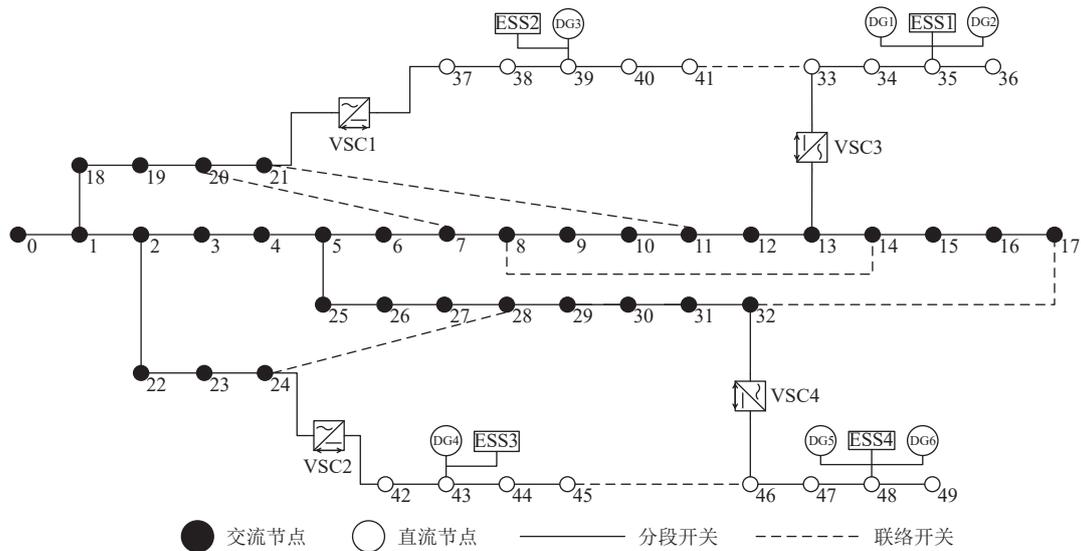


图2 49节点系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of the 49-node system

表 1 交直流混联配电网各节点的负荷等级
Table 1 Load grade of each node of AC/DC hybrid distribution network

负荷等级	节点
一级	7、13、14、23、37、38、43
二级	6、9、20、21、24、33、34、42、44、45、47
三级	其他

表 2 交直流混联配电网各节点的负荷类型
Table 2 Load types at each node of AC/DC hybrid distribution network

负荷类型	节点
政府、医疗负荷	3、6、13、17、23、31
居民负荷	1、4、5、7、9、10、15、16、19、20、21、24、26、29、32
商业负荷	其他

表 3 交直流混联配电网各节点的可控参数
Table 3 Controllable parameters of nodes in AC/DC hybrid distribution network

是否可控	节点
可控	10、12、16、29、42、44、45
不可控	其他

表 4 联合系统参数
Table 4 Combined system parameters

编号	接入位置	储能充放电功率		储能能量	
		上限/kW	下限/kW	10:00出力值/kW	20:00出力值/kW
1	35	300	1800	845	725
2	39	240	1400	775	650
3	43	300	1800	960	850
4	48	100	1400	720	600

表 5 算法性能对比
Table 5 Algorithm performance comparison

算法	最佳适应度	平均迭代次数	平均求解时间/s
BPSO	127.81	40.8	42.07
BALO	129.59	26.9	35.12
LBALO	122.67	10.2	32.82

部最优，并提高收敛速度，同时在求解时能快速的得到最优解。

4.2 算例分析

配电网中不同类型的负荷在不同时刻的用电需求不同，本文选取 2 个典型故障时刻 10:00 与 20:00 进行故障分析。假设在这两个时刻配电网中支路 7~8、19~20、22~23 因故障断开。负荷 8~17、20~21、23~24、33~45 因故障失电。计算失电负荷权重系数。计算所得的节点权重系数如

附录表 A2 所示，故障恢复策略如图 3 所示。

对失电负荷的权重系数进行排序，一级负荷节点 13、14、23、43、37、38 必须完全恢复供电。10:00 时，负荷节点 17、42、45 需要优先被恢复。风光储联合系统 1 以及光储系统 2 孤岛组合向一级负荷节点 13、14、37、38 以及其他失电负荷供电，由于风光储联合系统 1 出力较大，将其作为主电源，VSC3 站采用 $V_{ac}-\theta$ 控制方式调节交流侧电压，而 VSC1 采用 $P-Q$ 控制模式则维持两侧功率的平衡，VSC2 站则采用 $V_{ac}-\theta$ 控制方式，光储系统 3 通过 VSC2 换流站向一级负荷 23，优先恢复负荷 42、45 供电；20:00 时，负荷节点 9、20、21、24、33、34、44 需要优先被恢复。直流侧联合储能系统通过 VSC 向失电交流侧负荷供电，孤岛内的 VSC 换流站均转换成 $V_{ac}-\theta$ 控制方式。其中风光储联合系统 1 通过 VSC3 换流站向一级负荷 13、14 以及其他失电负荷供电，光储系统 2 通过 VSC1 换流站向权重系数高的 20、21 供电，同时通过闭合联络开关支路 11-21 向优先恢复负荷 9 供电，光储系统 3 通过 VSC2 换流站向一级负荷 23，优先恢复负荷 24 供电。负荷节点 17、45 由主网通过闭合联络开关支路 17-32、45-46 恢复供电。孤岛情况与故障恢复方案分别如表 6、表 7 所示。

由算例结果可知。故障时刻为 10:00 时，含光伏发电的联合系统出力高，政府、医疗负荷需求高。负荷节点 17、42、45 为此类负荷。负荷节点 45 权重高应被优先恢复，将其纳入孤岛范围内，此时进行负荷响应时需要削减孤岛内权重系数低且可控的负荷节点 44 以满足孤岛运行约束；故障时刻为 20:00 时，含光伏发电的联合系统出力低，居民负荷需求高。负荷节点 9、24、44 为此类负荷。光储系统 2 通过 VSC 向优先恢复负荷 9 供电，由于光储系统出力不足，负荷响应削减孤岛内的可控负荷以维持孤岛运行稳定，光储系统 3 通过 VSC 向一级负荷 23 以及优先恢复负荷 24 供电，光储系统出力不足，削减可控负荷 42 的可控量后仍不能满足约束，需切除权重低的政府、医疗负荷节点 45 以满足运行约束，孤岛外的失电负荷由主网恢复供电。

故障时刻不同时，联合系统出力、负荷的权重系数均不同，得到的故障恢复方案也不同。考虑负荷需求时变性以及需求响应的孤岛划分和故

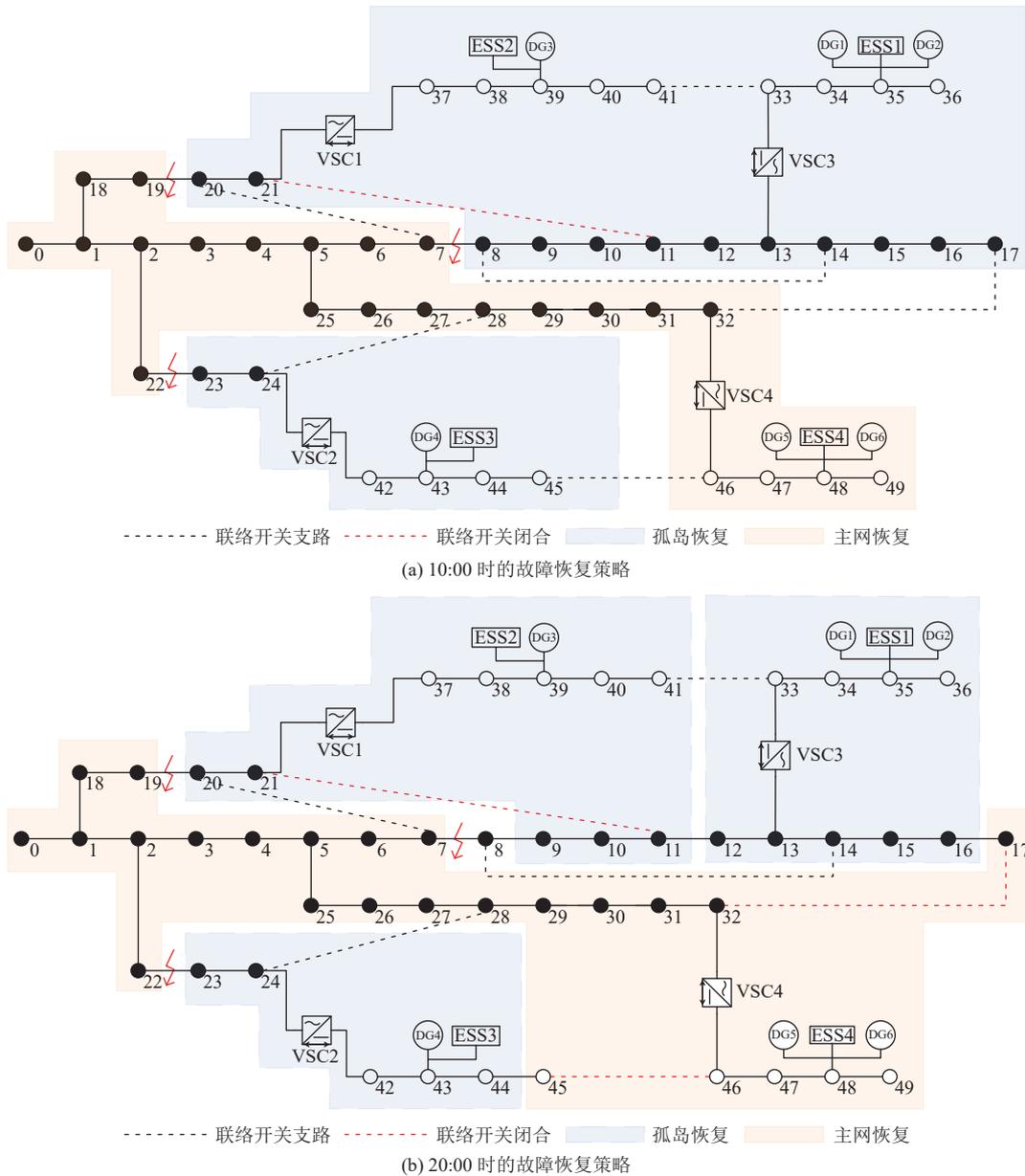


图3 不同故障时刻的故障恢复策略

Fig. 3 Failure recovery strategies at different failure

表6 孤岛方案

Table 6 Island scheme

故障时刻孤岛个数	断开开关	闭合开关	开关动作次数	
10:00	2	7-8、19-20、22-23	11-21	1
20:00	3	7-8、8-9、11-12、16-17、19-20、22-23、44-45	11-21、17-32、45-46	6

表7 故障恢复方案

Table 7 Failure recovery solutions

故障时刻	失电负荷节点	VSC控制方式		
		VSC1	VSC2	VSC3
10:00	无	$V_{ac}-\theta$	$P-Q$	$V_{ac}-\theta$
20:00	8	$V_{ac}-\theta$	$V_{ac}-\theta$	$V_{ac}-\theta$

障恢复方案保障了不同类型负荷在用电需求度高时的用电可靠性，提高了配电网用户的满意度。

4.3 算例对比

为进行对比分析。故障后，本文采用3种策略进行恢复重构。

策略1：故障发生后考虑VSC控制方式的变化对恢复的影响，但不考虑负荷需求的时变性对故障恢复的影响，采用本文所提算法进行恢复；

策略2：故障发生后考虑VSC控制方式的变化对恢复的影响，但不考虑负荷的需求响应对故

障恢复的影响，采用本文所提算法进行恢复；

策略 3：本文所提的故障恢复策略。

假设 20:00 时配电网发生故障。通过 3 种策略对配电网进行恢复。策略 1：不考虑负荷需求的时变性时，在故障时刻需求度高的一级负荷 23、居民负荷 9、10 由于孤岛内联合系统出力不足被切除。策略 2：不考虑负荷的需求响应时，孤岛范围减小，居民负荷节点 8-10、17、44-45 由于孤岛内联合系统出力不足被切除。故障时刻 20:00 的策略 1、策略 2 的划分图如图 4 (a)、

(b) 所示。策略 3 的划分图如图 3 (b) 所示。孤岛方案对比如表 8，故障恢复结果对比如表 9。

对不同策略得到的 3 个故障恢复结果进行对比可知。策略 1 未考虑负荷需求的时变性对故障恢复的影响，划分孤岛时，一级负荷 23 以及在故障时刻恢复需求度高的居民负荷 9、10 被切除，孤岛的需求响应方差为 314.08，联合系统出力远大于孤岛内的负荷需求，造成资源的浪费。负荷失电节点虽然少，但一、二级负荷未能完全恢复供电，供电恢复率仅为 86.40%；策略 2 不考虑负

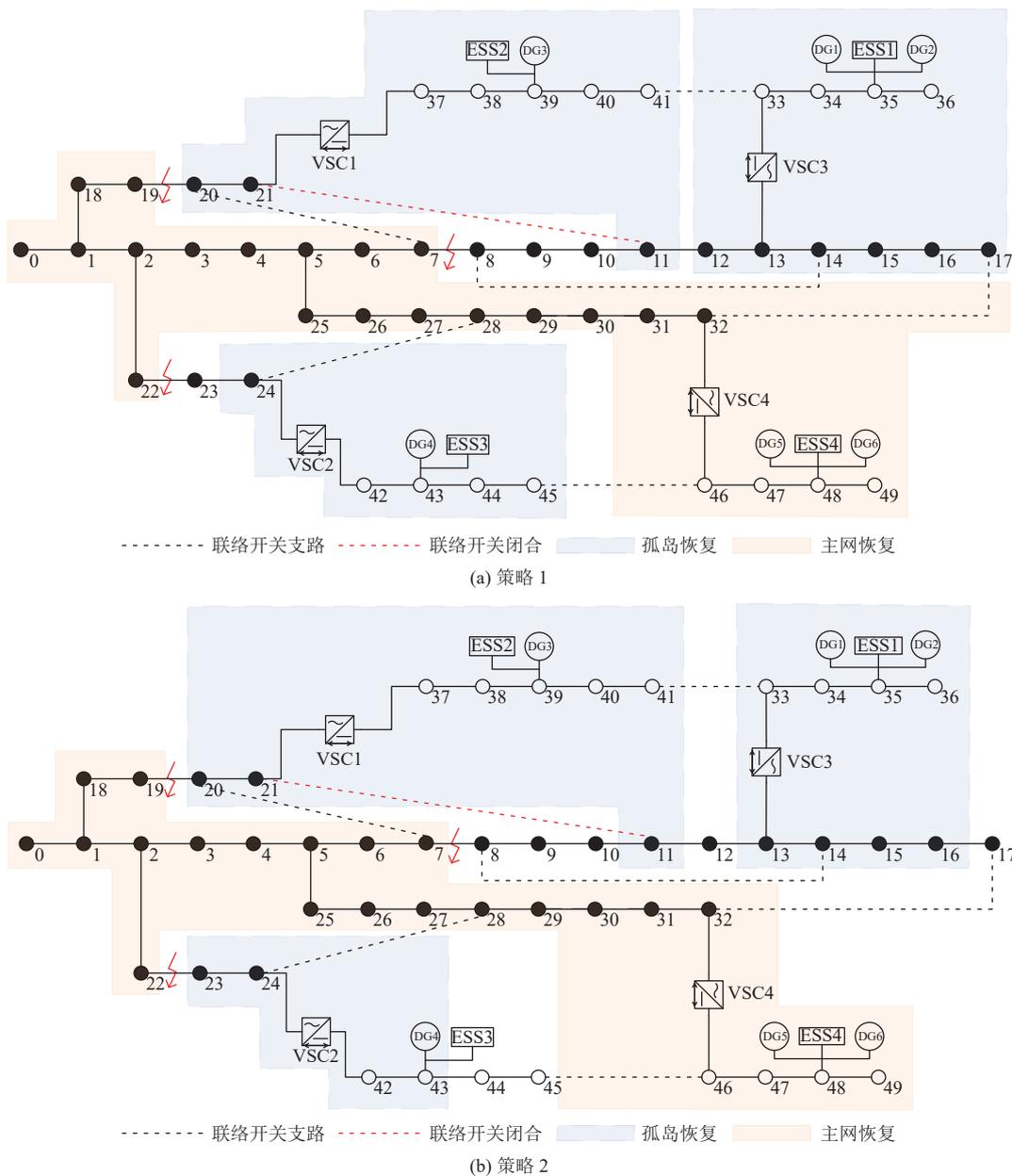


图 4 20:00 时不同策略的故障恢复结果

Fig. 4 Failure recovery results of different strategies when a fault occurs at 20: 00

表8 20:00发生故障时不同孤岛策略的数据比较
Table 8 Data comparison of different island strategies when a fault occurs at 20: 00

策略	一、二级负荷供电恢复率/%	响应方差
1	71.76	314.08
2	100	77.5
3	100	12.17

表9 20:00发生故障时不同恢复策略的数据比较
Table 9 Data comparison of different recovery strategies when a fault occurs at 20: 00

策略	负荷恢复量/kW		可控负荷削减量/kW	供电恢复率/%	失电负荷节点
	孤岛	主网			
1	1840	2260	60	86.40	8-10、23
2	2030	2260	0	90.41	8-10、12、17、44-45
3	2165	2410	140	96.40	8

荷的需求响应对故障恢复产生的影响，导致了孤岛范围的减小以及应被优先恢复的负荷失电，同时伴随着大量失电负荷节点产生。供电恢复率仅为92.09%，虽然能保证重要负荷的完全恢复供电，但未能保证负荷在用电需求度高时的用电可靠性，影响了负荷用户的满意度。孤岛的需求响应方差为77.5，联合系统出力略大于孤岛内的负荷需求；策略3综合考虑了负荷需求的时变性和负荷的需求响应对故障恢复的影响，供电恢复率相较于前两种方案分别提高了10.00%、5.99%。保障了重要负荷的供电以及故障时刻用电需求度高的负荷的供电恢复，孤岛的需求响应方差为12.17，联合系统出力最接近负荷需求，满足了源荷两侧的出力平衡。得到的恢复结果优于前两个策略，实现供电恢复最大化并满足了用户需求，同时保证了孤岛的安全运行。

5 结论

1) 建立风光储联合系统模型以及权重负荷模型。故障发生时，首先通过改变VSC的控制方式形成孤岛，保证重要负荷的可靠恢复以及权重系数高的负荷优先恢复，孤岛时利用需求响应通过调节可控负荷使孤岛安全运行。

2) 划分孤岛后考虑主网转供对仍失电的负荷恢复供电，最终得到最优恢复策略。储能装置和需求响应的加入提高了分布式电源的利用率以及孤岛运行的安全性，恢复策略的动态调整满足了分布式电源出力以及用户需求的时变性。

3) 采用LBALO进行计算，求解算法LBALO有效解决了基础BALO易于陷入局部最优的问题，在收敛、求解速度以及搜索效率上具有一定的优越性。最后，通过算例验证了本文所提交直流混联配电网的故障恢复策略在故障发生时可快速的进行自愈，保证供电可靠性。

(本刊附录请见网络版，印刷版略)

参考文献

- [1] 黄弦超. 含分布式电源的配电网故障恢复模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 52-57.
HUANG Xianchao. Fault recovery model for distribution networks with distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(19): 52-57(in Chinese).
- [2] 王雨婷, 张筱慧, 唐巍, 等. 考虑光伏及负荷时变性的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2016, 40(09): 2706-2716.
WANG Yuting, ZHANG Xiaohui, TANG Wei, et al. Distribution network fault recovery considering photovoltaic and load variability[J]. Power System Technology, 2016, 40(09): 2706-2716(in Chinese).
- [3] 李振坤, 何苗, 苏向敬, 等. 基于生物体免疫机制的智能配电网故障恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7924-7937.
LI Zhenkun, HE Miao, SU Xiangjing, et al. A fault recovery method for intelligent distribution networks based on biological immune mechanism[J]. Proceedings of The CSEE, 2021, 41(23): 7924-7937(in Chinese).
- [4] 郁嘉嘉, 黄少先. 基于免疫原理的蚁群算法在配电网恢复中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008(17): 28-31.
XUN Jiajia, HUANG Shaoxian. Application of ant colony algorithm based on immune principle in distribution network restoration[J]. Power System Protection and Control, 2008(17): 28-31(in Chinese).
- [5] 田书欣, 刘浪, 魏书荣, 等. 基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 1-11.
TIAN Shuxin, LIU Lang, WEI Shurong, et al. Dynamic reconstruction of distribution networks based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 1-11(in Chinese).
- [6] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.
YANG Lijun, LV Xuejiao, LI Dan, et al. Coordinated optimization strategy for multiple fault repair and recovery in distribution networks with distributed power sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20):

- 13-19(in Chinese).
- [7] 杨丽君, 张广超, 吕雪姣, 等. 考虑可控负荷的含分布式电源配电网短时故障供电恢复 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 11-17+26.
YANG Lijun, ZHANG Guangchao, LV Xuejiao, *et al.* Consideration of short-term fault power supply recovery in distributed power distribution networks with controllable loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 11-17+26(in Chinese).
- [8] 何晨可, 韦钢, 袁丁, 等. 计及充换放储一体化电站的主动配电网故障恢复 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 32-38.
HE Chenke, WEI Gang, YUAN Ding, *et al.* Active distribution network fault recovery considering integrated charging, swapping, discharging, and storage power stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 32-38(in Chinese).
- [9] 姚卓磊, 黄文焘, 余墨多, 等. 智能配电网电力-通信灾害故障动态协调恢复方法 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 87-94.
YAO Zhuolei, HUANG Wentao, YU Moduo, *et al.* Dynamic coordinated recovery method for power communication disaster faults in intelligent distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 87-94(in Chinese).
- [10] 刘家权, 刘坤, 周金涛, 等. 基于鲁棒优化的电-气互联型主动配电网故障恢复方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(07): 66-74.
LIU Jiaquan, LIU Shen, ZHOU Jintao, *et al.* Robust optimization based fault recovery method for activedistribution networks with electric gas interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(07): 66-74(in Chinese).
- [11] 马天祥, 王春英, 贾静然, 等. 基于二进制粒子群算法的交直流混合配电网故障恢复方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(09): 112-119.
MA Tianxiang, WANG Chunying, JIA Jingran, *et al.* Fault recovery method for AC/DC hybrid distribution networks based on binary particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(09): 112-119(in Chinese).
- [12] 张璐, 余顺江, 王辰, 等. 计及 VSC 运行方式与故障恢复优化的交直流混合配电网可靠性评估 [J]. 电网技术, 2022, 46(01): 292-303.
ZHANG Lu, YU Shunjiang, WANG Chen, *et al.* Reliability evaluation of AC/DC hybrid distribution networks considering VSC operation mode and fault recovery optimization[J]. Power System Technology, 2022, 46(01): 292-303(in Chinese).
- [13] 卢俊杰, 杨晓东, 张有兵, 等. 含多端柔性软开关的互联配电网系统故障恢复优化决策方法 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14 [2022-12-29]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220762.
LU Junjie, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, *et al.* Optimization decision method for fault recovery in interconnected distribution systems with multiterminal flexible soft switches [J/OL]. Proceedings of The CSEE: 1-14 [2022-12-29]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220762.
- [14] 尹航, 刘友波, 高红均, 等. 含分布式储能系统的交直流混合配电网负荷恢复策略 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(08): 25-32.
YIN Hang, LIU Youbo, GAO Hongjun, *et al.* Loadrecovery strategy for AC/DC hybrid distribution network with distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(08): 25-32(in Chinese).
- [15] 王红君, 陈智晴, 赵辉, 等. 考虑风光荷不确定性的配电网故障恢复策略 [J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4356-4364.
WANG Hongjun, CHEN Zhiqing, ZHAO Hui, *et al.* Distribution network fault recovery strategy considering uncertainty of wind, load[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4356-4364(in Chinese).
- [16] 田晶京, 李安乐, 高锋阳, 等. 含光伏发电和时变负荷的主动配电网孤岛划分 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(09): 125-131.
TIAN Jingjing, LI Anle, GAO Fengyang, *et al.* Active distribution network islanding with photovoltaic power generation and time-varying loads[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(09): 125-131(in Chinese).
- [17] 朱兰, 严正, 杨秀, 等. 计及需求侧响应的微网综合资源规划方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2621-2628.
ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, *et al.* A microgrid comprehensive resource planning method considering demand side response[J]. Proceedings of The CSEE, 2014, 34(16): 2621-2628(in Chinese).

收稿日期: 2023-05-25

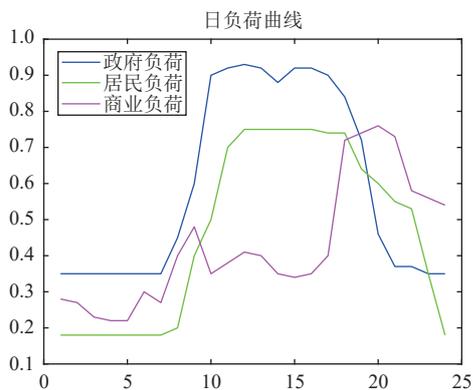
作者简介:

刘青(1974), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: hddl_liuqing781@163.com;

朱维佳(2000), 女, 硕士研究生, 通信作者, 研究方向为向为配电网故障恢复, E-mail: zwjjjjjer@163.com;

马天祥(1986), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为配电网系统运行与控制, E-mail: matianxiang1986@126.com。

附录 A



附图 A1 不同行业负荷的典型日负荷曲线

Fig. A1 Typical daily load curves of node loads in different industries

附表 A1 不同类型负荷日用电需求

Table A1 Daily electricity demand for different types of loads

时刻	政府、医疗负荷	商业负荷	居民负荷
01:00	0.35	0.50	0.28
02:00	0.35	0.70	0.27
03:00	0.35	0.75	0.23
04:00	0.35	0.75	0.22
05:00	0.35	0.75	0.22
06:00	0.35	0.75	0.30
07:00	0.35	0.75	0.27
08:00	0.45	0.74	0.40
09:00	0.60	0.74	0.48
10:00	0.90	0.64	0.35
11:00	0.92	0.60	0.38
12:00	0.93	0.55	0.41
13:00	0.92	0.53	0.40
14:00	0.88	0.35	0.35
15:00	0.92	0.18	0.34
16:00	0.92	0.50	0.35
17:00	0.90	0.70	0.40
18:00	0.84	0.75	0.72
19:00	0.72	0.75	0.74
20:00	0.46	0.75	0.76
21:00	0.37	0.75	0.73
22:00	0.37	0.75	0.58
23:00	0.35	0.74	0.56
24:00	0.35	0.74	0.54

附表 A2 负荷节点权重系数

Table A2 Load node weight coefficient

节点编号	负荷节点权重系数	
	10:00	20:00
1	1	5
2	0.90	4.50
3	6	1.20
4	0.60	3
5	0.60	3
6	100	20
7	200	1000
8	0.60	3
9	6	30
10	0.45	2.25
11	0.60	3
12	0.60	3
13	600	120
14	60	300
15	0.60	3
16	0.60	3
17	0.90	4.50
18	0.90	4.50
19	0.90	4.50
20	9	45
21	9	45
22	0.90	4.50
23	2100	420
24	22	110
25	0.60	3
26	0.60	3
27	0.60	3
28	1.20	6
29	2	10
30	1.50	7.50
31	10.50	2.10
32	0.600	3
33	10	50
34	9	45
35	0.60	3
36	0.60	3
37	100	500
38	80	400
39	0.40	2
40	0.50	2.50
41	0.80	4
42	9	45
43	100	500
44	8	40
45	6	30
46	0.30	1.50
47	4	20
48	0.90	4.50
49	0.80	4