

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191071

计及可控负荷参与的主动配电网动态恢复供电策略

刘礼邦¹, 武传涛², 随权², 陈冲², 林湘宁², 李正天²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室
(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对传统基于单时间断面的恢复供电策略难以长时间保持负荷恢复期间的电气孤岛稳定运行问题, 提出了一种主动配电网多时段动态恢复供电策略。通过引入可控负荷, 提高了电网重建的效率和恢复期间负荷的运行稳定性。此外, 针对主动配电网负荷动态恢复模型变量过多、难以求解的问题, 提出一种启发式孤岛动态调整算法。仿真结果验证了所提策略的可行性和优越性。

关键词: 主动配电网; 可控负荷; 动态供电恢复; 孤岛划分

Power supply strategy for active distribution network dynamic recovery with controllable load participation

LIU Libang¹, WU Chuantao², SUI Quan², CHEN Chong², LIN Xiangning², LI Zhengtian²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology
(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: A multi-period dynamic power supply recovery strategy for active power distribution is proposed. This is to tackle the problem that the traditional power recovery strategy based on a single-time section finds it difficult to maintain the stable operation of electrical islands for a long time during load recovery. The efficiency of grid reconstruction and the stability of load operation during recovery are improved by introducing controllable loads. In addition, a heuristic island dynamic adjustment algorithm is proposed for the problem that the active distribution network load dynamic recovery model has too many variables and is difficult to solve. Simulation results verify the feasibility and superiority of the proposed strategy.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51537003).

Key words: active distribution network; controllable load; dynamic power recovery; island partition

0 引言

在主动配电网中, 风、光等新能源 DG 的接入, 给主动配电网稳定可靠运行带来了极大挑战^[1]。尤其是在电网事故场景下, 当配电网失去大电网支撑后, 如何计及风光出力不确定性, 充分利用配电网内部 DG 以及可控负荷对用户负荷进行短时应急支撑, 是当前研究的一大热点。

目前, 在主动配电网供电恢复策略方面, 学术界已开展大量研究。文献[2]利用储能电池和交互式负荷提升了主动配电网的调节能力。文献[3]通过对

负荷权重分析优化了供电孤岛划分。文献[4]通过V/f控制模式利用柔性软开关处理故障恢复中无法由联络开关连接上级网络的子网, 建立网损最小、失电负荷最小的恢复策略。此外, 有研究者提出基于不确定二层规划理论的主动配电网故障恢复模型, 采用博弈论和混沌粒子群算法进行上下层问题的求解^[5]。另外, 在含风电电网以及不同电源构成的电网中, 如何进行供电恢复以及恢复的效果对比也有研究涉及^[6-9]。文献[10]利用智能终端单元进行故障定位和供电恢复区域划分。文献[11]对于不同供电子区域的不同场景制定恢复策略, 再结合离散细菌群体趋药性(DBCC)算法进行不同子区域策略间的交叉性优化。文献[12]基于广度优先算法进行了故

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51537003)

障状态下的孤岛规划,提出了改进型 V/f 控制策略加快故障恢复后孤岛的重新并网。

从上述工作可以看出,现有的研究多是将负荷恢复看成单时间断面的优化^[13-15],这种做法很难适用于风光出力占有较大比例的主动配电网。为此,一些研究提出可将整个恢复周期划分成多个时段,在每个时段分别求解最优孤岛划分策略,由此,恢复的负荷总量可以达到最大。如文献[16]基于DG 随时间变化的动态模型进行时段划分,以故障恢复时段内损失电量之和最小为目标得到配电网动态恢复策略。文献[17-18]计及柔性负荷的调节能力,设计了先进行初步孤岛划分再通过柔性负荷优化的恢复策略。但是,这类研究往往设定在负荷恢复阶段负荷只能单调增加,不能再切除。这种设定显然不够合理,不能适应 DG 出力下爬坡的情形。

为此,本文在传统供电恢复策略的基础上,综合考虑可控负荷、重要负荷与新能源 DG 占比、静态安全域、线路开关次数限制等因素的影响,提出了计及可控负荷参与的主动配网动态恢复供电策略。利用启发式算法进行供电孤岛划分和拓展。为解决孤岛长时间运行的稳定性问题,提出了基于启发式算法的孤岛动态调整算法,形成了计及恢复负荷总量、设备开关次数和重要负荷被中断次数等重要指标的不同恢复策略以及负荷恢复供电的 pareto 解,算例分析验证了所提动态恢复策略的有效性和优越性。

1 主动配电网建模

1.1 DG 模型

考虑主动配电网中不同 DG 的特性,从功率特性、黑启动、调压与调频特性等方面出发,对 DG 进行分类,可分为常规 DG、新能源 DG 和储能系统三部分。

1.1.1 常规 DG 模型

微型燃气轮机等常规 DG 可作为负荷恢复期间的主力电源与黑启动电源。这类 DG 应满足功率约束与爬坡约束:

$$P_{DG,i}^{\min} \leq P_{DG,i}(t) \leq P_{DG,i}^{\max} \quad (1)$$

$$Q_{DG,i}^{\min} \leq Q_{DG,i}(t) \leq Q_{DG,i}^{\max} \quad (2)$$

$$-R_{G,i}^{Pd} \leq P_{DG,i}(t) - P_{DG,i}(t-1) \leq R_{G,i}^{Pu} \quad (3)$$

$$-R_{G,i}^{Qd} \leq Q_{DG,i}(t) - Q_{DG,i}(t-1) \leq R_{G,i}^{Qu} \quad (4)$$

式中: $P_{DG,i}(t)$ 、 $Q_{DG,i}(t)$ 分别为常规 DG 有功功率和无功功率; $P_{DG,i}^{\max}$ 、 $P_{DG,i}^{\min}$ 、 $Q_{DG,i}^{\max}$ 和 $Q_{DG,i}^{\min}$ 分别为有功和无功功率上下限; $R_{G,i}^{Pu}$ 、 $R_{G,i}^{Pd}$ 、 $R_{G,i}^{Qu}$ 和 $R_{G,i}^{Qd}$ 分别

为有功功率、无功功率的上爬坡率与下爬坡率。

1.1.2 新能源 DG 模型

新能源 DG 的出力应满足式(5)和式(6)。

$$0 \leq P_{RDG,i}(t) \leq P_{RDG,i}^*(t) \quad (5)$$

$$0 \leq Q_{RDG,i}(t) \leq \sqrt{S_{RDG,i}^2 - P_{RDG,i}^*(t)^2} \quad (6)$$

式中: $P_{RDG,i}(t)$ 、 $Q_{RDG,i}(t)$ 分别为新能源机组 i 的有功和无功实际出力值; $P_{RDG,i}^*(t)$ 为有功功率预测值; $S_{RDG,i}$ 为视在功率限值。

1.1.3 储能模型

在应急工况下,储能系统可对周围负荷进行短时支撑,承担起主力电源和黑启动电源的角色。其模型可用如下公式进行描述。

$$C_i(t) = C_i(t-1) + P_{c,i}(t) \cdot \eta - P_{d,i}(t) \cdot \eta^{-1} \quad (7)$$

$$C_i^{\min} \leq C_i(t) \leq C_i^{\max} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{c,i}(t) \leq \tau_i(t) P_{c,i}^{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{d,i}(t) \leq [1 - \tau_i(t)] P_{d,i}^{\max} \quad (10)$$

式中: $C_i(t)$ 、 C_i^{\max} 、 C_i^{\min} 分别为储能系统 i 的容量及其上下限值; $P_{c,i}(t)$ 、 $P_{d,i}(t)$ 、 $P_{c,i}^{\max}$ 、 $P_{d,i}^{\max}$ 分别为充放电功率及其最大值; $\tau_i(t)$ 为布尔型变量,表示储能系统的充放电状态, $\tau_i(t)=1$ 表示充电, $\tau_i(t)=0$ 表示放电; η 为储能的总体效率。

储能装置的无功出力极限受限于所连逆变器的容量,与式(6)近似,不再罗列。

1.2 负荷特性

在多时段负荷恢复的研究中,现有工作多是以历史数据为基础,生成预测序列,在适当考虑误差的基础上,形成负荷模型^[16,19-20]。但这种方法过于激进,难以应用于含有新能源 DG 的孤岛网络中。为此,本文假定在恢复供电期间,待恢复的负荷始终处于额定功率,即

$$P_{Load,i}(t) = P_{Load,i}^N \quad (11)$$

式中: $P_{Load,i}(t)$ 为节点 i 在 t 时段的有功功率; $P_{Load,i}^N$ 为负荷 i 的额定功率。

此外,按照对供电可靠性要求的降低,负荷可分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。为有效区分不同负荷的复电优先级,本文采用权重法对不同等级负荷进行权重处理。

主动配电网中一般还包括可调负荷和可平移负荷,可调度负荷的特性可描述为

$$P_{Load,i}(t) = \xi(t) P_{Load,i}^N \quad (12)$$

式中, $\xi(t)$ 的取值区间为 $[0,1]$,具体取值由电网调度根据实际需要确定。而可平移负荷的功率特性与

常规负荷一致,但在网络重构期间这类负荷可视为可被频繁投入和切出,以此来有效保障已复电孤岛中常规负荷的供电可靠性。

1.3 孤岛配电网网络模型

对于孤岛运行状态的配电网,可采用树模型进行建模,但需要进行适当简化,即合并同一节点处的所有黑启动电源,相邻节点间如无开关连接,或者未接负荷,都需直接合并或与其他节点合并。经过这些操作后,简化了配电网的树模型,提高了可控程度。

2 主动配电网负荷动态恢复模型

为恢复更多的失电负荷,主动配电网需要充分挖掘新能源 DG 的功率支撑潜力,形成以新能源 DG 为辅助电源的孤岛供电区域。然而,考虑到风、光等新能源出力具有随机性,难以准确预测,孤岛供电区域中已复电负荷将可能面临再次被切除的风险^[21-22]。为此,本节充分考虑已复电孤岛的静态安全域大小、线路开关次数、负荷投切次数等约束条件,以复电量最大化为目标,提出了主动配电网多时段动态恢复供电策略。

2.1 基于单目标的配电网动态恢复模型

配网恢复应以恢复供电期间的有功负荷电量总和最大作为目标函数,即

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \beta_i P_{Load,i}^R(t) \quad (13)$$

式中: T 为预计停电时长; β_i 为负荷权重; $P_{Load,i}^R(t)$ 为 t 时段节点 i 处恢复供电的有功负荷; N_B 为节点数。

在主动配电网恢复供电阶段,除了计及上述 DG 的运行约束外,还需考虑孤岛运行约束、静态安全域约束、重要负荷与新能源 DG 出力占比约束和线路开关动作约束等。

孤岛运行约束主要包括潮流约束、联通性约束和节点电压约束等,具体公式参见文献[19]。由于新能源 DG 实际出力与预测值之间存在偏差,孤岛供电区域在优化过程中需要考虑其风险影响,留有一定的裕度,以保证复电区域的可靠运行。为此,增加静态安全域约束:

$$\Delta \text{region}_{\max,i}^u(t) / \Delta \text{region}_{\max,i}^u(t) \geq \gamma \quad (14)$$

$$\Delta \text{region}_{\max,i}^d(t) / \Delta \text{region}_{\max,i}^d(t) \geq \gamma \quad (15)$$

$$\Delta \text{region}_{\max,i}^u(t) = \Delta \text{region}_{\max,i}^d(t) = \alpha_i \cdot P_{RDG,i}^*(t) \quad (16)$$

式中: $\Delta \text{region}_{\max,i}^u(t)$ 、 $\Delta \text{region}_{\max,i}^d(t)$ 分别为时段 t 内孤岛静态安全域允许波动的上、下最大值,可采用

静态安全域方法求解^[23]; $\Delta \text{region}_{\max,i}^u(t)$ 、 $\Delta \text{region}_{\max,i}^d(t)$ 分别为新能源 DG 实际功率上下波动的最大值; α_i 为最大预测误差; γ 为覆盖范围,保守设定值为 100%,也可由调度人员自行调整。

考虑到重要负荷如一级、二级负荷对供电可靠性要求较高,在含新能源 DG 的孤岛供电区域内,若重要负荷所占比例较高,则可能会造成重要负荷因新能源 DG 出力波动而被切除,难以保障重要负荷对可靠性的要求。为此,对含新能源 DG 的孤岛供电区域,增加如下重要负荷占比约束:

$$\sum_{i \in \Omega_s} P_{Load,i}^{lm}(t) - \sum_{i \in \Omega_s} (P_{DG,i}(t) + P_{c,i}(t)) \leq \lambda \cdot \sum_{i \in \Omega_s} P_{RDG,i}(t) \quad (17)$$

式中: $P_{Load,i}^{lm}(t)$ 为 t 时段孤岛 s 中重要负荷节点的功率; λ 为重要负荷的比例。

在供电恢复过程中,由于新能源 DG 的出力不确定性,根据预测负荷与预测出力情况对孤岛供电区域进行动态调整,线路开关可能出现多次动作。但是,频繁动作会对线路开关造成一定的损伤,更严重者可能造成开关故障。为此,考虑开关动作约束:

$$\sum_{t=1}^T u_{ij}^{sw}(t) \leq n_{ij}^k \quad (18)$$

$$\Gamma_{ij}^{sw} \geq n_{ij}^t \cdot \Delta t \quad (19)$$

式中: $u_{ij}^{sw}(t)$ 为馈线 $i-j$ 开关动作标志, $u_{ij}^{sw}(t)=1$ 标志开关闭合或断开, $u_{ij}^{sw}(t)=0$ 标志不动作; n_{ij}^k 为开关动作次数限制; Γ_{ij}^{sw} 为馈线 $i-j$ 开关状态转换时间; n_{ij}^t 为开关状态转换最小时间间隔。

2.2 基于双目标的主动配电网负荷动态恢复模型

在供电恢复期间,除了要尽可能多地恢复供电,还要考虑避免负荷的反复投切、线路开关的动作次数、节点切除次数等因素。为此,综合考虑多种因素的影响,本文在单目标优化模型的基础上,将其拓展成多目标优化模型,见式(20)一式(22)。

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T n_{\text{switch}}(t) \quad (20)$$

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \beta_i P_{Load,i}^C(t) \quad (21)$$

$$\min f_4 = \sum_{t=1}^T n_{\text{node}}(t) \quad (22)$$

式中: $n_{\text{switch}}(t)$ 为 t 时段线路开关动作总次数; $n_{\text{node}}(t)$ 为 t 时段节点切除总数量; $P_{Load,i}^C(t)$ 为 t 时段

节点 i 切除负荷功率。

为便于形成 pareto 解集, 将式(13)最大化问题转化为式(23)的最小化问题, 即为供电恢复期间未恢复供电的有功负荷量最小。

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_B} \beta_i (P_{Load,i}(t) - P_{Load,i}^R(t)) \Delta t \quad (23)$$

3 模型求解

主动配电网负荷动态恢复模型是一个典型的混合整数非线性优化问题, 离散变量及约束众多, 涉及多个优化时段, 变量规模较大, 常规算法难以求解。然而, 若将各时段解耦优化, 则可以有效降低问题的规模, 大大提高求解速度, 但存在各时段间耦合约束难以满足的缺点。为此, 本文首先以 f_1 为目标函数, 采用动态规划法进行最优孤岛划分, 接着计及负荷可控性, 基于单目标或多目标的启发式算法对孤岛运行进行动态调整, 这样可以有效减少运算量, 提高求解效率。

3.1 最优孤岛划分算法

对于目标函数(13), 若不考虑式(17), 即不考虑重要负荷功率占新能源 DG 出力比例约束, 可用一维或二维树形背包算法进行孤岛划分, 步骤如下:

- 1) 建立主动配电网树模型;
- 2) 搜索配电网具备黑启动能力的 DG(BDG), 并以容量最大的 BDG 为根节点, 应用一维或二维树形依赖背包算法开展孤岛划分, 直至生成最优孤岛;
- 3) 对已生成孤岛进行检验, 若不满足运行约束和静态安全约束, 则切除孤岛边缘节点中价值最小的节点后重新校验, 直到满足要求为止;
- 4) 若仍存在 BDG, 则返回步骤 2), 若不存在 BDG, 则孤岛划分结束。

基于动态规划法的最优孤岛划分算法流程如图 1 所示。

在完成初始孤岛划分后, 若两相邻孤岛存在一定功率裕度, 则合并后可能支撑更多的负荷。此外, 在初始孤岛划分时, 仅以 BDG 为电源节点, 而未考虑新能源 DG 的供电潜力。因此, 可采用启发式孤岛拓展算法对所形成的初始孤岛进行进一步拓展, 算法的完整流程见图 2。

3.2 孤岛动态调整算法

在完成最优初始孤岛划分后, 考虑到外部故障恢复时间的不确定性, 需要根据新能源出力预测信息, 对下一个时段的孤岛恢复策略进行动态调整, 同时, 也可通过调整 2.1 节中约束 (式(14)、式(15)、式(17)一式(19))的松紧, 优化求解模型的目标 1 和目标 2。

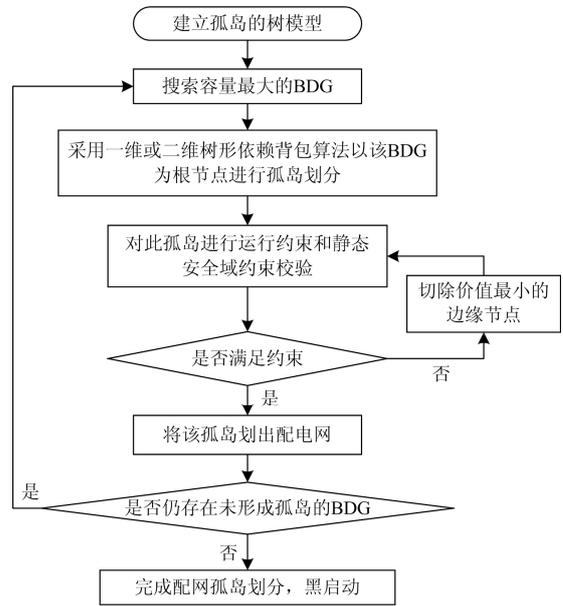


图 1 初始孤岛划分算法流程图

Fig. 1 Flow chart of initial islanding algorithm

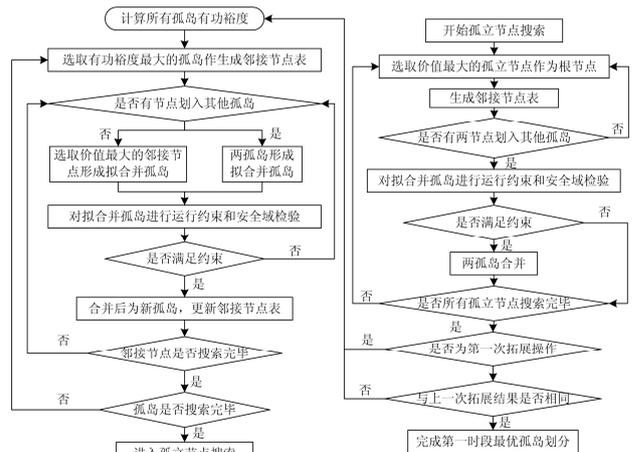


图 2 基于启发式算法的孤岛拓展算法

Fig. 2 An island expansion algorithm based on heuristic algorithm

结合上述讨论, 本文提出一种启发式孤岛动态调整算法, 在满足 2.1 节中的约束(式(14)、式(15)、式(17)一式(19))的前提下, 完成孤岛的动态调整, 算法完整流程见图 3。对于所建立的双目标优化模型, 本文采用智能算法 NSGA-II 进行求解, 获取其 pareto 解集^[24]。篇幅所限, 不再赘述。

4 算例分析

4.1 仿真模型

仿真模型采用改进的 IEEE33 节点配电网模型, 见图 4。其中, 节点 15、28 处储能系统容量为 2 MW·h, 其他参数详见附录表 A1-A2。DG 出力预

测误差 $\alpha = 20\%$ 。17 节点设定接有可调负荷, 可中断负荷设定接入 18 节点, 不考虑馈线 17-18 开关动作约束(式(18)一式(19))。馈线开关最多动作 4 次, 最小状态转换间隔为 2。

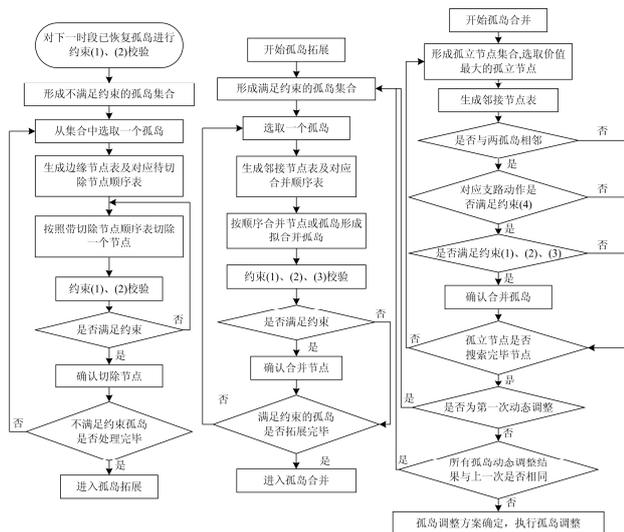


图 3 孤岛动态调整算法流程

Fig. 3 Flow chart of the island dynamic adjustment algorithm

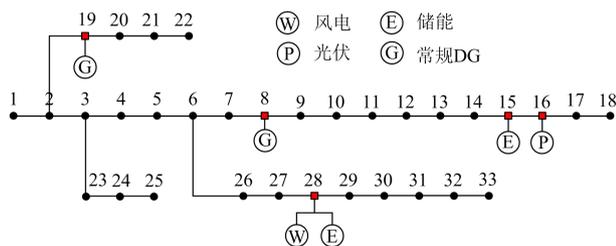


图 4 IEEE 33 节点配网系统结构图

Fig. 4 Structure of IEEE 33-node distribution network system

配电网失去主网供电的时刻设定在 09:30, 停电总时长为 3.5 h。储能系统初始 SOC 为 0.5, SOC 上下限分别为 0.95 和 0.2, 充放电效率为 0.95。配电网内各馈线开关的初始状态均设定为闭合, 可调负荷的初值设定 0。

本文算例计算平台配置为: 处理器 Intel Core i7-7500U, 运行内存 16 G。本文算法运行一次耗时 226 s, 具有良好的通用性。

4.2 不同场景下负荷动态恢复结果分析

为了比较不同风、光出力场景下主动配电网动态恢复供电策略, 在不考虑约束(17)的前提下, 采用图 5、图 6 中风光出力进行对比分析。

动态恢复策略优化结果如表 1—表 3 所示, 在情景 1 与情景 2 中, 恢复有功负荷电量均达到 198.3 MW·h 以上, 尽管两情景风光波动差异较大, 但所恢复负荷仅相差 2.9 MW·h。表明本文所提主动

配网动态恢复供电策略能够有效划分孤岛供电区域, 充分发挥新能源 DG 的功率支撑潜力, 并通过动态调整孤岛供电区域应对新能源 DG 出力的波动, 有效保障了重要负荷的稳定可靠供电。

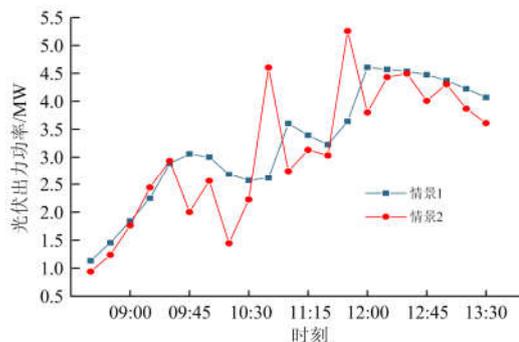


图 5 节点 16 光伏出力曲线

Fig. 5 Photovoltaic output curve of node 16

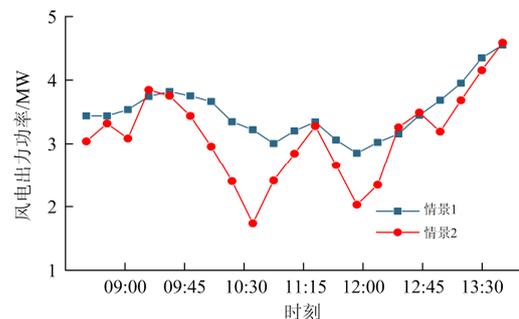


图 6 节点 28 风电出力曲线

Fig. 6 Wind power output curve of node 28

表 1 情景 1 下动态恢复供电策略优化结果

Table 1 Optimization result of dynamic power supply recovery strategy in scenario 1

时段	发生调整的孤岛数	情景 1
1	4	孤岛 1: 1、2、3、19、20、23 孤岛 2: 8、9、10、11 孤岛 3: 28、29、30 孤岛 4: 14、15、16、17、18
2	0	同 1
3	0	同 1
4	2	孤岛 3: 切除 30, 合并 26、27 孤岛 4: 切除 18
5	1	孤岛 4: 切除 14, 合并 18
6	0	同 5
7	1	孤岛 4: 合并 14
8	0	同 7
9	1	孤岛 4: 切除 18
10	1	孤岛 4: 合并 18
11	1	孤岛 4: 合并 13
12	0	同 11
13	0	同 11
14	1	孤岛 3: 合并 6

进一步分析风光出力波动的影响, 结合表 1—表 3 可知, 情景 1 中风光出力波动较小, 而情景 2 风光出力波动较大。相较于情景 1, 情景 2 动态恢复策略优化结果中馈线开关动作次数、切除节点次数以及切除有功负荷电量均有所增加, 这表明为应对风光出力的波动, 需要以牺牲开关动作次数、切除负荷节点等为代价, 换取负荷的稳定可靠供电。

表 2 情景 2 下动态恢复供电策略优化结果

Table 2 Optimization result of dynamic power supply recovery strategy in scenario 2

时段	发生调整的孤岛数	情景 2
1	4	孤岛 1: 1、2、3、19、20、23
		孤岛 2: 8、9、10、11
		孤岛 3: 28、29、30
		孤岛 4: 14、15、16、17、18
2	2	孤岛 3: 切除 30, 合并 26、27
		孤岛 4: 切除 18
3	0	不变
4	2	孤岛 3: 切除 26
		孤岛 4: 切除 14
5	0	不变
6	1	孤岛 4: 合并 13、14、18
		孤岛 3: 合并 26
7	2	孤岛 4: 切除 13、18
		孤岛 3: 合并 26
8	0	不变
9	0	不变
10	2	孤岛 3: 切除 26
		孤岛 4: 合并 13、18
11	0	不变
12	1	孤岛 3: 合并 26
13	1	孤岛 3: 合并 6
14	2	孤岛 3: 切除 29, 合并 7
		孤岛 2、3 合并

表 3 不同情景下动态恢复供电策略优化结果

Table 3 Optimization results of dynamic power supply recovery strategy in different scenarios

函数值	情景 1	情景 2
恢复有功负荷电量/MW·h	201.2	198.3
馈线开关总动作次数	16	25
切除有功负荷电量/MW·h	2.38	3.71
切除节点次数	3	7

4.3 可控负荷的作用分析

在配电网动态恢复过程中, 负荷按最大功率进行优化, 尽管可保障孤岛供电区域稳定运行, 但由于处理过于保守, 未能最大化利用新能源 DG。配电网在供电恢复过程中可充分发挥负荷可控优势, 应对风、光出力波动, 提高新能源 DG 的利用率,

恢复更多的负荷, 提高供电可靠性。

为此, 设计两种配电网恢复供电情景进行探讨:

情景 3: 15、16 节点负荷采用实际功率, 其他节点负荷仍采用最大功率, 风光出力采用情景 2 中的出力数据。

情景 4: 15、16 节点负荷采用实际功率, 17、18 节点分别为可调负荷和可中断负荷, 其他节点负荷仍采用最大功率, 风光出力采用情景 2 中的出力数据。如图 7 所示。

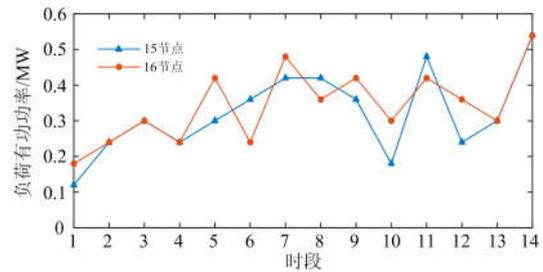


图 7 15、16 节点实际有功功率

Fig. 7 Actual active power of 15 and 16 nodes

情景 3 与情景 4 优化结果如表 4 所示, 相较于情景 3, 情景 4 恢复有功负荷电量由 186.8 MW·h 增加到 188.2 MW·h, 略有提升。而馈线开关总动作次数由 42 次降低至 33 次, 切除有功负荷电量由 4.7 MW·h 降低至 4.0 MW·h, 起初节点次数由 13 次降低至 9 次, 均有明显下降。究其原因, 可调负荷和可中断负荷的灵活接入放宽了开关动作次数对寻优空间的限制, 使得孤岛供电区域在调整过程中可以分配更多操作次数给常规负荷, 获得整体更优的恢复策略。

表 4 情景 3 和情景 4 优化结果

Table 4 Optimization result target values of scenario 3 and scenario 4

函数值	情景 3	情景 4
恢复有功负荷电量/MW·h	186.8	188.2
馈线开关总动作次数	42	33
切除有功负荷电量/MW·h	4.7	4.0
切除节点次数	13	9

进一步分析可控负荷对新能源 DG 消纳的影响, 15 节点储能 SOC 变化曲线与 16 节点光伏实际出力曲线分别如图 8 和图 9 所示。由图 9 可见, 时段 6, 情景 3 下的 SOC 已经逼近上限, 而情景 4 下的 SOC 仅为 0.6, 而根据图 5 可知该时段的光伏出力较高, 因而情景 3 下被迫产生了弃光行为。此外, 从时段 8 开始, 情景 3 的 SOC 一直保持最高储能, 失去了调节能力, 而情景 4 的 SOC 则依然保持中等

储能水准,并在9到14时段继续发挥消纳能力。由此可见,由于可控负荷的灵活调节能力,储能系统SOC得以尽可能地维持在中等水准,以便在负荷低谷时消纳富余电量,在负荷高峰时短时供电。而不考虑可控负荷时,储能系统SOC将过早达到上限,无法消纳更多的光伏出力,造成一定弃光。可见可控负荷既可增强电网孤岛运行的能力,还可充分发挥新能源DG的功率支撑能力。

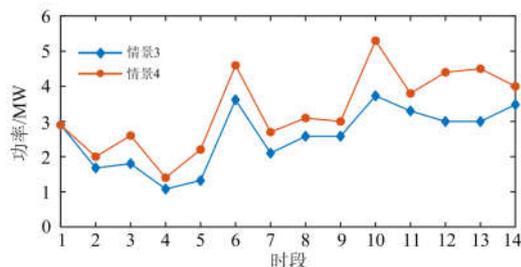


图8 情景3和情景4下16节点光伏实际有功出力
Fig. 8 Actual power output of 16-node PV in scenario 3 and scenario 4

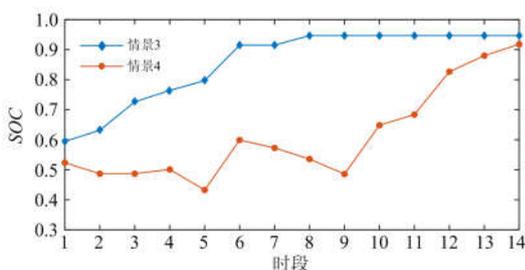


图9 情景3和情景4下15节点储能SOC变化曲线
Fig. 9 Curves of energy storage SOC of 15 nodes under scenario 3 and scenario 4

4.4 不同恢复策略和约束选择时恢复结果分析

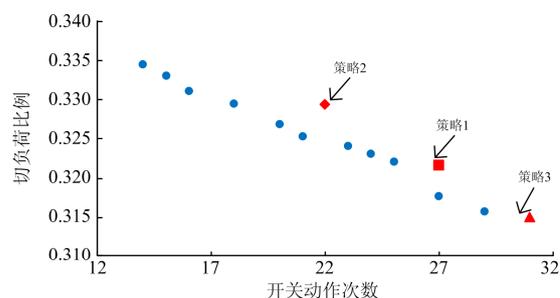
设计3种配电网恢复供电策略进行对比:

策略1: 约束(22)松弛后的主动配电网多时段动态恢复策略;

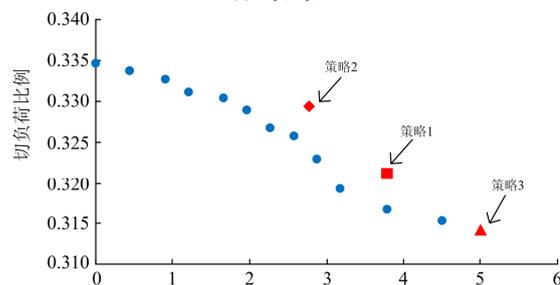
策略2: 计及约束(22)的主动配电网多时段动态恢复策略,其中重要负荷占比设定为40%,即 $\mu = 40\%$;

策略3: 以 f_1 为目标的单时段配电网恢复策略^[21-22,25]。

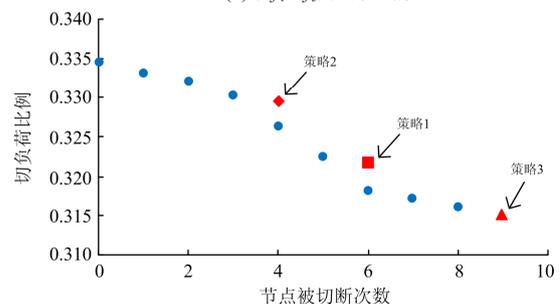
为了更好地对比分析不同恢复供电策略的优化效果,采用多目标优化模型以形成pareto解集,并对解集中的不同解进行对比分析。其中,多目标优化模型的目标函数可设置为:①以 f_1 、 f_2 为目标;②以 f_1 、 f_3 为目标;③以 f_1 、 f_4 为目标。以情景2为例,pareto解集以及不同策略优化结果如图10所示。



(a) 以 f_1 和 f_2 为目标函数



(b) 以 f_1 和 f_3 为目标函数



(c) 以 f_1 和 f_4 为目标函数

图10 pareto解集及不同策略优化结果

Fig. 10 Optimization results of pareto solution set and different strategies

结合图10可知,策略3实际为单时段供电恢复策略,其恢复的负荷总量最大,但其馈线开关动作次数、重复切除有功负荷电量、切除节点次数三个指标方面表现最差;而策略1与策略2采用多时段动态恢复策略,相对比单时段供电恢复策略,多时段供电恢复策略考虑馈线开关动作、负荷重复投切等约束,从而在设备投切次数和负荷恢复比例间实现了更好的平衡。

5 结论

针对传统单时段供电恢复策略无法维持孤岛稳定运行的问题,本文提出了一种面向主动配电网的多时段动态负荷恢复策略。相对于单时段恢复供电策略,所提策略在负荷投切次数和负荷恢复数量实现了更好的平衡。另外,本文深入探讨了可中断负

荷与可调负荷在供电恢复过程中的积极作用，通过仿真算例验证了可控负荷在供电恢复过程中，不仅能加强已恢复孤岛的运行稳定性，还能提高新能源 DG 的利用率，有助于尽快重建电网。

附录 A

表 A1 IEEE 33 节点系统 DG

Table A1 IEEE 33 node system DG

所接入节点	DG 类型	出力区间/MW
8	微燃机	[3,5]
16	储能	[-1,1]
15	光伏发电	[0,6]
19	微燃机	[3,6.2]
28	风力发电	[0,6]
28	储能	[-1,1]

表 A2 IEEE 33 节点系统负荷信息表

Table A2 Information table of IEEE 33 node system load

节点号	功率/MW	权重	节点号	负荷功率/MW	负荷权重
1	0.13	1	18	0.63	1
2	1.25	5	19	0.92	5
3	1.24	5	20	0.88	1
4	0.82	3	21	0.86	1
5	0.61	1	22	0.92	1
6	0.84	1	23	1.04	5
7	0.63	1	24	4.20	1
8	2.12	5	25	4.20	1
9	1.07	3	26	0.60	1
10	1.22	3	27	0.60	1
11	0.45	1	28	0.40	5
12	1.23	1	29	1.24	3
13	0.61	1	30	2.03	3
14	1.22	3	31	1.52	1
15	0.61	5	32	2.14	1
16	0.58	3	33	0.60	1
17	0.58	1			

参考文献

[1] 邢海军, 程浩忠, 张沈习, 等. 主动配电网规划研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2705-2711.
XING Haijun, CHENG Haozhong, ZHANG Shenxi, et al. Review of active distribution network planning[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2705-2711.

[2] CHEN Q, ZHAO X, GAN D. Active-reactive scheduling of active distribution system considering interactive load and battery storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 320-330. DOI: 10.1186/s41601-017-0060-2.

[3] 胡博, 王昕, 郑益慧, 等. 基于萤火虫优化算法的分布式发电设备容量分配及配电网孤岛划分[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 21-26.

HU Bo, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Calculation of isolated island partition and distributed generator capacity based on firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 21-26.

[4] 娄铨伟, 张筱慧, 丛鹏伟, 等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 23-31.
LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23-31.

[5] 马天祥, 程肖, 贾伯岩, 等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 48-57.
MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 48-57.

[6] ZHU H, LIU Y. Aspects of power system restoration considering wind farms[C] // International Conference on Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), September 8-9, 2012, Hangzhou, China.

[7] LEE S S. Hydro and gas turbine blackout restoration strategies in the South Korean power system[C] // 2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, MD, USA: 1-6.

[8] CHEN T, FENG L, LIU X, et al. Comparison study on restoration strategies of Chongqing power grid[C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), November 26-29, 2015, Changsha, China: 2425-2430.

[9] HOU Y. Restoration methods and applications in China and the development of EPRI's restoration tool[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA.

[10] 吴悦华, 高厚磊, 徐彬, 等. 有源配电网分布式故障自愈方案与实现[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 140-155.
WU Yuehua, GAO Houlei, XU Bin, et al. Distributed fault self-healing scheme and its implementation for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 140-155.

[11] 杨丽君, 安立明, 杨博, 等. 基于可达性分析的主动配电网多故障分区修复策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4864-4875.
YANG Lijun, AN Liming, YANG Bo, et al. Multi-fault partition repair strategy of active distribution network based on reachability analysis[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4864-4875.
- [12] 戴志辉, 王旭, 陈冰研. 主动配电网供电恢复过程中的孤岛划分及并网方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 1-7.
DAI Zhihui, WANG Xu, CHEN Bingyan. Islanding division and grid connection method during service restoration of active distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 1-7.
- [13] PHAM T T H, BÉLANGER Y, HADJSAID N. New challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 398-406.
- [14] 李振坤, 周伟杰, 钱啸, 等. 有源配电网孤岛恢复供电及黑启动策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 67-75.
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, QIAN Xiao, et al. Distribution network restoration and black start based on distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 67-75.
- [15] 张磐, 唐萍, 丁一, 等. 考虑分布式发电波动性的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 115-120.
ZHANG Pan, TANG Ping, DING Yi, et al. Service restoration strategy considering the volatility of distribution generations for active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 115-120.
- [16] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
QI Zheng, ZHANG Shoukui, LI Zhi, et al. Dynamic service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2016, 45(16): 31-38.
- [17] 李丝雨, 张彼德, 彭丽维, 等. 考虑柔性负荷调节能力的主动配电网动态孤岛划分策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(6): 1835-1842.
LI Siyu, ZHANG Bide, PENG Liwei, et al. Dynamic island partitioning strategy for active distribution network considering adjustment ability of flexible load[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(6): 1835-1842.
- [18] 李红伟, 林山峰, 吴华兵, 等. 基于动态规划算法的配电网孤岛划分策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 47-52.
LI Hongwei, LIN Shanfeng, WU Huabing, et al. Islanding strategy based on dynamic programming algorithm for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 47-52.
- [19] 刘伟佳, 孙磊, 林振智, 等. 含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 49-58.
LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage systems and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 49-58.
- [20] 李承熹, 杨强, 颜文俊. 含分布式光伏电源的微电网孤岛动态运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 99-105.
LI Chengxi, YANG Qiang, YAN Wenjun. Dynamic islanding operation of microgrid with distributed photovoltaic generators[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 99-105.
- [21] 陈珂宁, 吴文传, 张伯明, 等. 基于 IGDT 的有源配电网鲁棒恢复决策方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3057-3062.
CHEN Kening, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A robust restoration method for active distribution network based on IGDT[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3057-3062.
- [22] 陈玮, 周贤正, 李晏君, 等. 考虑电动汽车配置的主动配电网鲁棒孤岛恢复[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊): 58-67.
CHEN Wei, ZHOU Xianzheng, LI Yanjun, et al. A robust islanding restoration policy for active distribution network considering optimal allocation of emergency electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S): 58-67.
- [23] 杨明, 程凤璐, 韩学山. 电力系统实时调度的有效静态安全域法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1353-1362.
YANG Ming, CHENG Fenglu, HAN Xueshan. Real-time dispatch based on effective steady-state security regions of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1353-1362.
- [24] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [25] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust restoration method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 4005-4015.

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2020-01-05

作者简介:

刘礼邦(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与新能源微网技术。E-mail: liu.libang@qq.com

(编辑 周金梅)