

多源配电网主动孤岛恢复策略与 动态组网潮流分析方法

谭清波¹, 陈 春¹, 曹一家¹, 周迭辉², 李 锰³

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.珠海博威电气股份有限公司, 广东 珠海 519085;
3.国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要:多源配电网主动孤岛运行是极端条件下大范围电网故障时保障关键负荷供电、提升配电系统安全和可靠性的重要措施。为此,根据不同类型分布式电源及重要负荷的分布,以最小路径权值和最大重要负荷恢复量为目标,建立大停电初期的配电网孤岛黑启动方案的最优化模型,以保证关键负荷在尽可能短的时间内恢复。充分发挥BFGS信赖域算法收敛速度快、计算精度高的优点,提出多源配网主动孤岛黑启动组网过程动态潮流分析方法,利用动态潮流的频率与节点电压结果判断黑启动方案的可行性,实现多源配电网黑启动序列的有效性评估及方案优化。以改进的IEEE 33节点配电系统作为仿真算例,结果可以验证所提方法的有效性和创新性。

关 键 词:多源配电网;主动孤岛;黑启动方案;BFGS信赖域算法;动态潮流

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.06.015 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)06-0142-10

Intentional islanding recovery strategy and dynamic network power flow analysis for distribution networks with multi-source

TAN Qingbo¹, CHEN Chun¹, CAO Yijia¹, ZHOU Diehui², LI Meng³

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2.Zhuhai Powint Electric Co., Ltd., Zhuhai 519085, China; 3.Economic and Technological Research Institute,
State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Intentional islanding operation of distribution networks with multi-source is an important measure to ensure the power supply of critical loads and improve the safety and reliability of the distribution system when a large-scale grid fails under extreme conditions. Therefore, according to the distribution of different types of distributed power supply and important load, with the goal of minimum path weight and maximum recovery of important load, the optimization model of the distribution network island black start scheme at the early stage of major power failure is established to ensure the recovery of critical load in the shortest possible time. The advantages of fast convergence speed and high calculation accuracy of the BFGS trust region algorithm are fully used to propose a dynamic power flow analysis method for a self-organizing restoration process in intentional islanded distribution networks with multi-source. Then, the dynamic power flow's frequency and node voltage results are used to judge the feasibility of the black start scheme. The improved IEEE 33-node power distribution system is taken as a simulation example to verify the effectiveness and innovation of the proposed method.

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-10-06

基金项目: 国家自然科学基金(52007009); 湖南省自然科学基金(2020JJ5574); 湖南省教育厅优秀青年项目(19B003)

通信作者: 陈 春(1987—), 男, 工学博士, 教授, 主要从事智能配电网规划、配电网故障特性分析与自愈控制等相关研究;

E-mail: chch3266@126.com

Key words: distribution networks with multi-source; intentional islanding; black start scheme; BFGS trust region algorithm; dynamic power flow

分布式电源(distributed generation, DG)的大规模接入使得电力系统的规模日益扩大,其网络拓扑、动态潮流变得愈加复杂,给电力系统的安全、稳定运行带来日趋严峻的挑战,在极端条件下,大电网的供电安全无法得到保障^[1]。即使诸如美英这样发达国家也时有遭遇城市电网大面积停电事故,比如:2019年7月13日美国曼哈顿发生大面积停电,事故波及用户达7万户;同年8月9日英国的大断电事故几乎覆盖了大半个英国,受影响人数近百万^[2-3]。因此,针对大电网非可靠供电、极端条件下大电网故障等情况,亟待研究孤岛配电网黑启动方案,实现故障配电系统重要负荷快速恢复供电,提升电力系统弹性及生命力^[4-5]。

关于配电网黑启动方案及可行性分析问题,文献[6]针对风电参与黑启动的情况,提出了一种基于概率分布列的黑启动可行性评估方法;文献[7]提出了一种基于近邻传播聚类 and Slope One 算法的黑启动方案评估方法,解决了电力系统信息缺失情况下的黑启动方案评估问题,但该文中填补黑启动方案缺失值的方法具有很强的不确定性,其有效性还有待验证;文献[8]利用数据包络分析方法(data envelopment analysis, DEA)得到黑启动方案的输入、输出指标,进而判断该黑启动方案的可行性;文献[9]基于神经网络对配电网黑启动问题进行了研究并提出了多种孤岛配电网恢复方案;文献[10]通过萤火虫算法对黑启动策略进行优化以加速系统恢复、提高负荷恢复量;文献[11]首次将模型预测控制技术应用于电力系统恢复中,该技术能准确预测微电网的功率;文献[12]提出了考虑负荷恢复安全裕度的扩展黑启动优化方案;文献[13]根据动态规划算法、孤岛稳定裕度指标制定了孤岛内电源和负荷的启动序列;文献[14]运用粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)得到黑启动初期孤岛配电网最优 DG 启动和负荷恢复序列,但其所针对的是黑启动初期、负荷接入量不大以及 DG 可视平衡节点的理想情况,然而实际中为保证配电网的经济性和可靠性,孤岛配电网的控制策略一般采用对等控制,配电网中没有平衡节点。

配电网潮流计算是配电网稳定性分析的基础,现有的研究主要分布在潮流计算算法的改进、测量设备安装点优化和成本控制等方面。文献[15]提出了改进 Zbus 算法计算配电网潮流,对于径向网络系统, B/F (backward/forward) 算法总能保证收敛性,但是,当配电网网格化程度较高时,该算法的收敛性会变差。针对网格化网络,文献[16]提出了一种基于环路分析的潮流算法,该算法在配电网网格化程度增加时仍能保持算法稳定的收敛特性;文献[17]提出了一种新的中压配电网潮流分析测量方法,该方法可有效减小测量点的数量及安装成本并具有较高的精度和较小的计算量;文献[18]解决了孤岛配电网潮流计算问题,受其启发,本文针对对等控制策略下的孤岛配电网黑启动方案,分析配电网主动孤岛黑启动组网过程中的潮流,实现多源配电网黑启动序列的有效性评估。

目前,国内外学者对无平衡节点的孤岛配电网黑启动组网过程中的潮流分析研究不多,且还没有涉及关于孤岛配电网黑启动方案及其可行性分析的研究。为此,本文研究基于下垂控制 DG 的孤岛配电网黑启动方案,优化孤岛黑启动序列,解决孤岛配电网黑启动组网过程的动态潮流变化问题,可以实现 DG 主导的孤岛配电网黑启动序列优化及有效性评估。

1 多源配电网主动孤岛黑启动组网过程分析

多源配电网主动孤岛恢复有别于传统微电网孤岛运行模式,一方面,微电网孤岛运行方式固定(外部电网故障时微电网按照设定好的运行方式由并网模式转为孤岛模式),而多源配网主动孤岛恢复则是因故障位置不同而形成不同的方案;另一面,微电网孤岛恢复的范围很小,往往只是一栋或者若干栋楼宇,而多源配电网主动孤岛模式恢复的是局部电网。多源配电网结构如图1所示,多类型 DG 以直接并网或接入微电网形式并入配网。当整个配电网系统因

故障全部失电时,多源配网系统可通过黑启动技术,利用具备稳定供电能力的分布式电源与负荷逐步组网,实现主动孤岛运行保障供电。

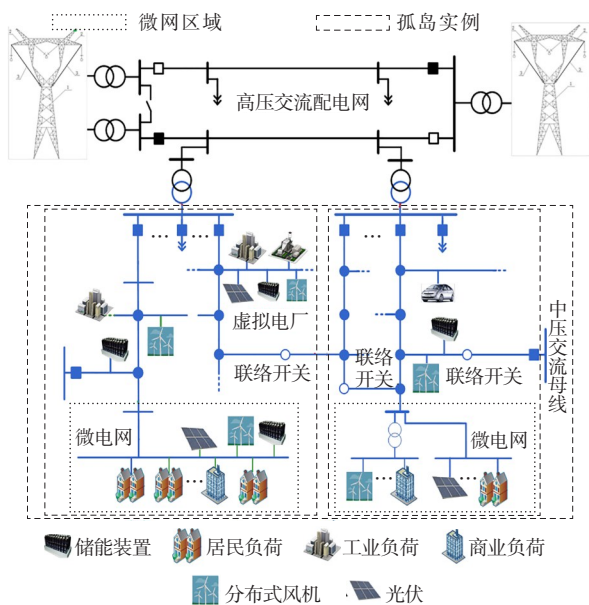


图1 多源配电网结构

Figure 1 Structure diagram of distribution systems with multi-source distributed generations

孤岛配电网的基本控制模式主要有主从控制和对等控制。在主从控制模式下,配电网由一个主控分布式电源来协调控制其他分布式电源, DG 之间需要设备进行通信^[19],增加了系统成本,且整个系统对主控 DG 和通信设施有较强的依赖性,导致系统可靠性低。而在对等控制模式下,系统所有 DG 在控制层面具有独立性,每个 DG 根据接入系统的就地信息进行控制,彼此之间不需要通信联系,可降低系统成本并提高可靠性,且能实现“即插即用”功能^[20-21]。下垂控制的 DG 装置通过模拟传统同步发动机的功率—频率静态特性,可以自适应系统频率和节点电压的变化调节自身功率输出,具备一定的调频调压能力。本文针对含有下垂控制 DG 装置且采用对等控制模式的配电网进行研究,系统中没有平衡节点。

2 多源配电网主动孤岛恢复模型

2.1 下垂控制 DG 装置模型

目前下垂控制主要有 2 种方式: $P-f/Q-U$ 和

$P-U/Q-f$ 下垂特性。本文中所有下垂控制的分布式电源装置都为 $P-f/Q-U$ 下垂特性,其表达式为

$$\begin{cases} P_m = P_{Gm} [1 - \frac{1}{m_{P_m}} (\omega_{0m} - \omega_m)] \\ Q_m = Q_{Gm} [1 - \frac{1}{n_{Q_m}} (U_{0m} - U_m)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_m 、 Q_m 和 P_{Gm} 、 Q_{Gm} 分别为第 m 个下垂控制 DG 装置流入孤岛配电网的实际有功、无功功率和额定有功、无功功率; U_{0m} 、 ω_{0m} 和 U_m 、 ω_m 分别为第 m 个下垂控制 DG 的空载输出电压幅值、角频率和实际输出电压幅值、角频率; m_{P_m} 、 n_{Q_m} 分别为第 m 个 DG 的有功、无功功率静态下垂特性。

2.2 静态负荷模型

负荷特性的定义是负荷从电力系统电源吸取的有功和无功功率随着负荷两端电压和系统频率变化而变化。在常规潮流计算中默认系统的频率变化很小,通常忽略频率波动对负荷特性的影响;而在含有下垂控制 DG 装置的孤岛系统中,系统频率的波动会变大且一般不会稳定在工频。因此,多源配电网中的静态负荷模型需要考虑负荷节点电压和系统频率的影响^[18]。

$$\begin{cases} P_{L,m} = P_{0m} U_m^\alpha [K_{pfm} (f - f_0)] \\ Q_{L,m} = Q_{0m} U_m^\beta [K_{qfm} (f - f_0)] \end{cases} \quad (2)$$

式中, $P_{L,m}$ 、 $Q_{L,m}$ 分别为第 m 个负荷节点从电力系统中实际吸取的有功、无功功率; P_{0m} 、 Q_{0m} 分别为第 m 个负荷在初始稳态时的有功、无功功率; f_0 、 f 分别为电力系统基准、实际频率; K_{pfm} 、 K_{qfm} 分别为负荷的有功、无功功率静态频率特性参数; α 、 β 分别为负荷的静态有功、无功功率指数。

不同负荷类型的有功和无无功功率指数不同,恒功率负荷模型的 α 、 β 通常等于零。多源配电网主动孤岛黑启动过程中会存在多种类型的负荷接入电网^[22]。本文采用的负荷电压特性系数如表 1 所示。

表 1 不同负荷的电压特性系数

Table 1 Voltage characteristic coefficients of different loads

负荷类型	α	β	负荷类型	α	β
恒功率	0.00	0.00	居民	0.92	4.04
工业	0.18	6.00	商业	1.51	3.40

2.3 孤岛配电网的潮流模型

孤岛配电网的潮流计算实际上是求解一组多元非线性功率方程组 $F(x)$ 。将潮流计算问题转化为无约束优化问题:

$$\min h(x) = \frac{1}{2} \| F(x) \|^2 \quad (3)$$

3 DG 启动顺序及其恢复路径

3.1 DG 启动顺序的一般原则

首先,根据 DG 的黑启动能力及功率稳定性对其进行分类^[23]:①是否具备黑启动能力,分为黑启动 DG (black-start, BDG)、非黑启动 DG (non black-start DG, NBDG);②是否能够输出稳定的功率,分为稳定输出功率式 DG (stable DG, SDG)、非稳定输出功率式 DG (non-stable DG, NSDG);③是否具备与电网调度中心关联的通信设施及控制设备,分为可控 DG (controllable DG, CDG)、非可控 DG (non controllable DG, NCDG)。

然后,选取 DG 最优启动顺序需要遵循的原则^[2-3,10]:①下垂控制 DG 装置因其具有良好的调压调频特性而优先启动,黑启动过程中配电网需具备一定的调压调频能力才能顺利恢复负荷;②同时满足 BDG、CDG 及 SDG 的 DG 优先启动,其次,满足 BDG 的 DG 优先级更高;黑启动过程的一般原则为 BDG 先启动再带动其他 NBDG;③容量大的 DG 优先启动,能为配电网提供更多的启动功率;④离重要负荷近的 DG 尽量优先启动,能够减少开关动作的数量,迅速恢复重要负荷。

3.2 优化模型

黑启动初期的目标是快速且尽可能多的恢复重要负荷,假设 DG 最优启动序列为 $D = \{D_{1G}, D_{2G}, \dots, D_{NG}\}$,且所有 DG 都能顺利启动并向负荷供电,则 DG 启动后的优化目标是以尽可能小的路径代价恢复尽可能多的重要负荷^[24]。本文采用文献[25]中的最短路算法 (floy-warshall 算法) 计算恢复路径的代价权值。

目标函数模型如下:

$$\min f = \frac{\sum_j^{C_m} \omega_j}{\sum_{i=1}^{C_n} S_{Li} h_i P_{Li}} \quad (4)$$

式中, ω_j 为第 j 条路径的代价权值; S_{Li} 用二进制表示第 i 个负荷是否恢复,取 0 表示未恢复,取 1 表示已恢复; h_i 为负荷的重要性权重,如本文中 1、2、3 级负荷分别取 1、0.1、0.01^[21]; P_{Li} 为第 i 个负荷的有功功率; C_m 为路径数; C_n 为负荷数; N_G 为 DG 个数。

4 基于和声算法求解

4.1 编码方式

和声搜索算法 (harmony search algorithm, HSA) 是一种全局优化智能算法,该算法具有求解速度快、寻优过程简单且易于得到全局最优解的特点^[26]。HSA 通过考虑概率微 (harmony memory considering rate, HMCR) 选择新解,调概率 (pitch adjusting rate, PAR) 对新解进行扰动。HMCR 和 PAR 的取值将直接影响算法中新解的多样性,进而影响算法的求解速度及质量。为充分利用和声记忆库的全局多样性,对 HMCR 和 PAR 的取值方法进行改进,使其能自适应记忆库粒子信息的变化^[27]。

$$K_{\omega_k} = \begin{cases} \sqrt{\frac{(F_{k0} - \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^{L-1} F_{ki})^2}{F_{kmax} - F_{kmin}}}, & F_{kmax} \neq F_{kmin} \\ K_{\omega_{k-1}} \cdot \text{rand}(), & F_{kmax} = F_{kmin} \end{cases} \quad (5)$$

$$H_{MCR,k} = H_{MCR,min} + K_{\omega_k} (H_{MCR,max} - H_{MCR,min}) \quad (6)$$

$$P_{AR,k} = P_{AR,min} + K_{\omega_k} (P_{AR,max} - P_{AR,min}) \quad (7)$$

式(5)~(7)中, $H_{MCR,k}$ 为第 k 次迭代时的 HMCR; F_{k0} 为第 k 次迭代时有效新解的适应度值; F_{ki} 为第 k 次迭代时除去有效新解外其他解的适应度值; $P_{AR,k}$ 为第 k 次迭代时的 PAR; $P_{AR,1}$ 为 PAR 最小值; $P_{AR,2}$ 为 PAR 最大值。

4.2 HSA 求解步骤

4.2.1 生成初始记忆库

首先初始化和声记忆库,随机生成 N 个 $N_G \times N_G$ 维粒子:

$$x = \begin{bmatrix} x_{i1}^1 & x_{i2}^1 & \dots & x_{iN_G}^1 \\ x_{i1}^2 & x_{i2}^2 & \dots & x_{iN_G}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{i1}^{N_G} & x_{i2}^{N_G} & \dots & x_{iN_G}^{N_G} \end{bmatrix}$$

其中,行表示 DG 启动顺序,列表示 DG 序号。如第

1列表示DG₁、第2列表示DG₂;第1行表示第1个启动、第2行表示第2个启动。每行每列只有一个1,其余均为0。例如: $X=[0\ 1\ 0; 0\ 0\ 1; 1\ 0\ 0]$ 表示DG启动顺序为DG₂、DG₃、DG₁。

4.2.2 产生新解

通过HMCR和PAR判断是否产生新解,为避免无效新解生成,根据DG启动顺序的一般原则,对记忆库外的新解构建一个评价指标:

$$T = \sum_{i=1}^a \lambda_1 + \sum_{j=1}^b \lambda_2 + \sum_{r=1}^c \lambda_3 \quad (8)$$

式中, a 为下垂控制DG的数量; $\lambda_1=1$ 表示下垂控制DG的启动顺序为 $(a+1)\sim N_G$, $\lambda_1=0$ 表示下垂控制DG的启动顺序为 $1\sim a$; b 为NBDG的数量, $\lambda_2=1$ 表示NBDG的启动顺序为 $1\sim b$, $\lambda_2=0$ 表示NBDG的启动顺序为 $(b+1)\sim N_G$; c 为BDG的数量, $\lambda_3=1$ 表示BDG的启动顺序为 $(c+1)\sim N_G$, $\lambda_3=0$ 表示BDG的启动顺序为 $1\sim c$ 。

该评价指标取值越小越好,取值等于0的DG启动顺序满足下垂控制DG和BDG优先启动的原则,将其视为有效新解,取值不等于0的DG启动序列无法满足要求,不能将其视为有效新解,重新在记忆库外取值,直至满足要求。

4.2.3 适应度值及最优路径的选取

分布式电源功率约束:孤岛系统内的分布式电源输出功率应大于恢复的负荷总功率,且分布式电源输出功率应满足其出力范围约束。

$$\sum_{u=1}^{N_G} S_{Gu} P_{Gu} - \sum_{i=1}^{C_u} S_{Lu} P_{Lu} > 0 \quad (9)$$

$$\sum_{u=1}^{N_G} S_{Gu} Q_{Gu} - \sum_{i=1}^{C_u} S_{Lu} Q_{Lu} > 0 \quad (10)$$

$$P_{Gu}^{\min} \leq P_{Gu} \leq P_{Gu}^{\max}, u \in N_G \quad (11)$$

$$Q_{Gu}^{\min} \leq Q_{Gu} \leq Q_{Gu}^{\max}, u \in N_G \quad (12)$$

式(9)~(12)中, S_{Gu} 用二进制表示第 u 个DG是否启动,取0表示未启动,取1表示已启动; S_{Lu} 用二进制表示第 u 个负荷是否恢复,取0表示未恢复,取1表示已恢复; P_{Gu} 、 Q_{Gu} 分别为第 u 个DG发出的有功和无功功率; P_{Lu} 、 Q_{Lu} 分别为第 u 个负荷的有功和无功功率; P_{Gu}^{\max} 、 P_{Gu}^{\min} 分别为第 u 个DG输出有功功率的上限和下限; Q_{Gu}^{\max} 、 Q_{Gu}^{\min} 分别为第 u 个DG输出无功功率的上限和下限。

本文选取的适应度函数为

$$F = \begin{cases} f+T, & \text{满足约束条件} \\ K, & \text{不满足约束条件} \end{cases} \quad (13)$$

式中, f 为目标函数; K 为一个很大的正数。

对和声记忆库中的每一个DG启动序列调用floyd-warshall算法,搜索任意2个DG的最短恢复路径,再将恢复路径中的重复节点置空,得到相应的DG启动及负荷恢复序列并计算其适应度值。适应度的取值越小越好,若产生的新解其适应度值比记忆库中最差解的适应度值低,则新解代替该最差解。循环迭代至满足终止条件后记忆库中适应度值最小的解即为最优DG启动序列,其最短恢复路径即为黑启动初期组网方案。

5 孤岛配电网黑启动方案可行性分析方法

求解无约束最优化问题式(3)的方法有多种,目前信赖域算法和线性搜索方法是其两类主要数值计算方法。与线性搜索方法相比,信赖域算法直接通过模型求解得到试探步长,而不是先确定搜索方向再寻找步长,具有可靠性、有效性和二阶收敛性的特点^[18]。

BFGS (broyden-fletcher-goldfarb-shanno) 信赖域算法的核心是信赖域子问题的求解,也就是目标函数二次模型在信赖域内极小值的求解。信赖域子问题表示为

$$\begin{cases} \min s(d^{(k)}) = h(x^{(k)}) + g_k^T d^{(k)} + \frac{1}{2} (d^{(k)})^T B_k d^{(k)} \\ \text{s.t. } \|d^{(k)}\|_2 \leq \Delta_k \end{cases} \quad (14)$$

通过求解式(14)可以得到迭代的试探步长 $d^{(k)}$,再利用评价函数判断是否接受试探步长以及信赖域半径是否更新,最后迭代求解得到配电网潮流。

依据HSA生成黑启动,当黑启动初期组网过程中电源启动顺序及负荷恢复路径后,运用上述BFGS信赖域算法计算孤岛配电网黑启动过程中每一步的系统潮流,判断恢复过程中潮流是否收敛,进而验证黑启动方案的合理性。潮流收敛的判断

依据为

$$\begin{cases} U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中, U_i 为节点 i 的实际电压值; $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点电压的下限和上限; f 为系统的实际频率; f_{\min} 、 f_{\max} 分别为系统频率的下限和上限。

若黑启动初期组网过程中潮流收敛, 则该黑启动初期组网方案合理, 并按照负荷重要性依次恢复配电网中剩余部分负荷; 若组网过程中潮流不收敛, 则逐步切除组网序列中的 2、3 级负荷, 优先保障 1 级负荷的供电, 直至潮流收敛; 若黑启动初期组网过程中出现潮流不收敛情况, 则该黑启动方案不合理。黑启动过程的潮流计算流程如图 2 所示。

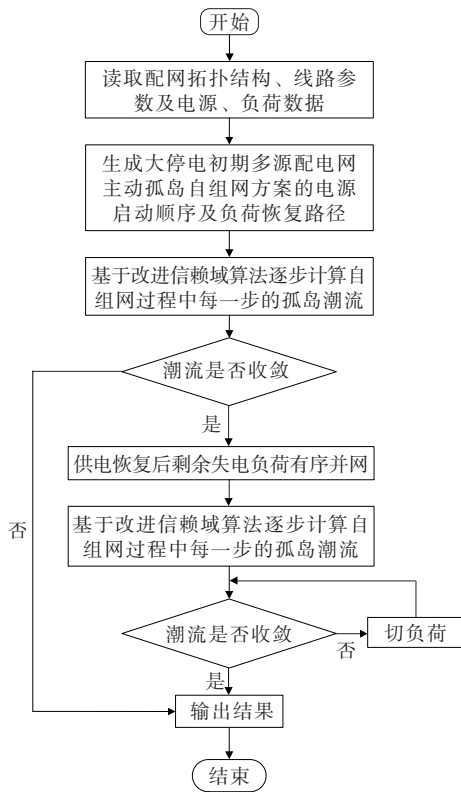


图 2 黑启动过程的潮流计算流程

Figure 2 Flow chart of power flow calculation for black start process

6 算例分析

6.1 仿真环境和算例系统

在改进的 IEEE 33 节点配网系统中, 利用 HSA 生成多源配电网黑启动组网方案, 并应用 BFGS 信

赖域算法计算组网过程潮流, 验证黑启动方案的可行性, 如图 3 所示。系统的基准容量取 10 MW, 基准频率取 50 Hz, 节点基准电压取 12.66 kV。

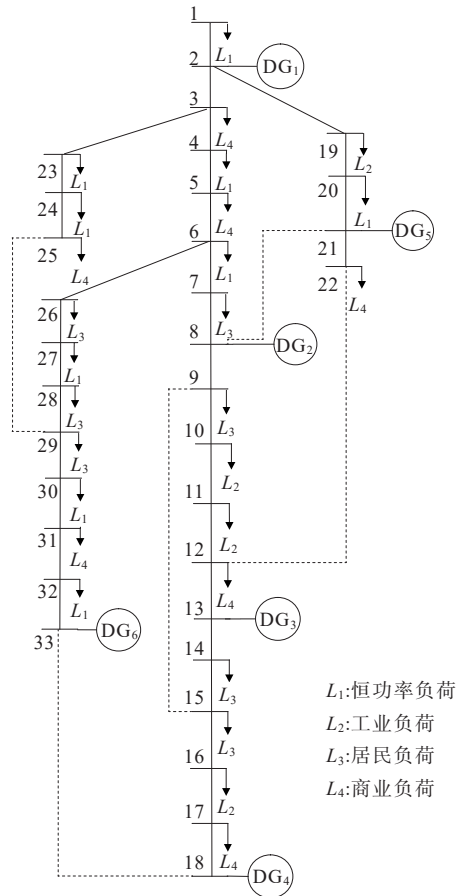


图 3 改进的 IEEE 33 节点配电网拓扑结构

Figure 3 Topology of the modified IEEE 33-node system

配电网正常运行时的安全约束设定: 稳态频率合格范围为 49.80~50.02 Hz, 节点电压幅值合格范围为 0.940 0~1.060 0 p.u.; 所有下垂控制 DG 装置的空载输出电压幅值及角频率为 $U_0^* = 1.060 0$ p.u.、 $\omega_0^* = 1.004 0$ p.u.; 在设定 $\omega_1 = 1.004 0$ p.u. 时, 系统的总负荷为 $1.608 9 + j0.579 4$ p.u.。

配电网中的负荷按其重要性分类: 1 级负荷连接 2、4、6、8、9、13、14、16、18、19、20、21、31、32、33 节点; 2 级负荷连接 3、5、7、10、11、15、17、22、29、23、24、25、27、28、30 节点; 3 级负荷连接 26、27 节点。记忆库容量 N 为 6, 迭代次数取 30, 配电网中的 DG 参数如表 2 所示。在配置为 Corei5 2.0 GHz CPU、4 GB 内存的计算机上, 利用 Matlab 编制 HSA 及潮流计算程序。

表2 IEEE 33节点配电网中的DG装置数据

Table 2 DG device data in calculation example

节点	电源类型	BDG/ NBDG	SDG/ NSDG	CDG/ NCDG	$P_{g0}/$ kW	$Q_{g0}/$ kVar
2	下垂	BDG	SDG	CDG	1 600	950
8	PQ	BDG	NSDG	CDG	750	320
13	PQ	BDG	SDG	NCDG	450	120
18	PQ	NBDG	SDG	CDG	400	170
21	下垂	BDG	SDG	NCDG	2 500	1 600
33	PQ	NBDG	SDG	CDG	500	260

6.2 黑启动方案的仿真验证

分别利用HSA和文献[14]中的PSO独立求解黑启动初期组网序列40次,取其适应度平均值,得到收敛曲线,如图4所示,PSO与HSA收敛于同一解且HSA所需迭代次数明显少于PSO,当HSA迭代次数超过9次后,适应度值稳定收敛于全局最优解0.012 619,验证了HSA能够快速搜索到最优DG启动及负荷恢复序列。此外,HSA相对于PSO的优势还在于其算法实现简单,便于编程。DG启动顺序及负荷恢复路径如表3所示。

在含有下垂控制DG装置的孤岛配电网潮流计算中,BFGS信赖域算法的有效性已经得到了验证,且具有良好的收敛性、对未知变量初值的依赖性小等优点^[18]。针对上述IEEE 33节点黑启动组网方案,运用BFGS信赖域算法计算组网过程中的动态潮流。由潮流计算得到已并网节点电压的最大值、最小值及系统频率,如图5、6所示,已并网节点电压均在合格范围(0.940 0~1.060 0 p.u.),未并网的节点电压标幺值为0,系统频率也在合格范围(49.80~50.02 Hz)波动,该黑启动初期方案合理。

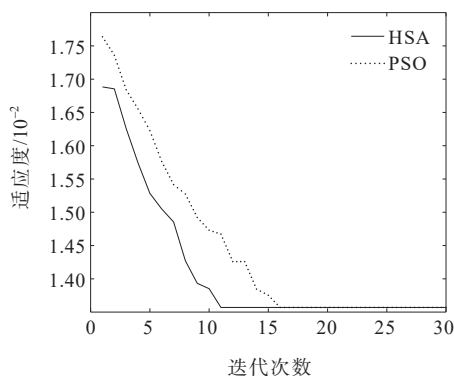


图4 PSO与HSA收敛曲线

Figure 4 PSO and HSA convergence curve

表3 IEEE 33节点配电网黑启动初期恢复顺序

Table 3 Black start recovery sequence of IEEE33 node distribution network

步骤	恢复节点顺序	恢复顺序
1	2	启动电源1
2	19	恢复负荷19、投入线路2-19
3	20	恢复负荷20、投入线路19-20
4	21	恢复负荷21、投入线路20-21、启动电源5
5	8	启动电源2、投入线路8-21
6	9	恢复负荷9、投入线路8-9
7	10	恢复负荷10、投入线路9-10
8	11	恢复负荷11、投入线路10-11
9	12	恢复负荷12、投入线路11-12
10	13	启动电源3、投入线路12-13
11	14	恢复负荷14、投入线路13-14
12	15	恢复负荷15、投入线路14-15
13	16	恢复负荷16、投入线路15-16
14	17	恢复负荷17、投入线路16-17
15	18	启动电源4、投入线路17-18
16	33	启动电源6、投入线路18-33
17	32	投入线路32-33

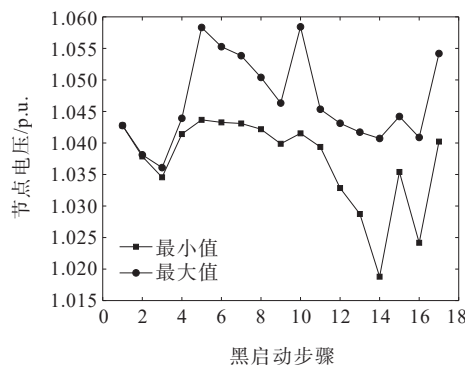


图5 黑启动过程中节点电压的最大、最小值

Figure 5 Maximum and minimum node voltage during black start

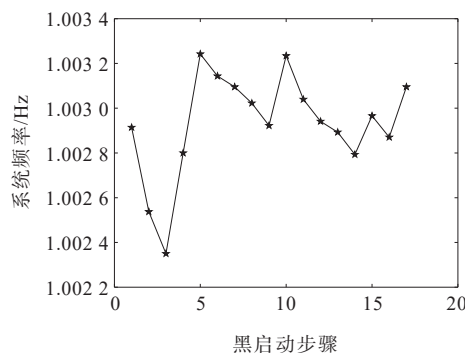


图6 黑启动组网过程中系统频率

Figure 6 System frequency during black start networking

为进一步恢复配电网剩余重要负荷,按照负荷重要程度生成黑启动组网方案,则配电网完整的 DG 启动顺序及负荷恢复路径如表 4 所示。组网过程中的潮流计算结果如图 7、8 所示,已并网的节点电压均在合格范围(0.940 0~1.060 0 p.u.),系统频率在合格范围(49.80~50.02 Hz)波动。综上所述,配电网在黑启动组网过程中能可靠、安全运行,该黑启动方案合理。

表 4 IEEE 33 节点配电网黑启动恢复顺序

Table 4 Black start recovery sequence of IEEE 33 node distribution network

步骤	恢复顺序	恢复的负荷节点及线路
1	2	启动电源 1
2	19	恢复负荷 19、投入线路 2-19
3	20	恢复负荷 20、投入线路 19-20
4	21	恢复负荷 21、投入线路 20-21、启动电源 5
5	8	启动电源 2、投入线路 8-21
6	9	恢复负荷 9、投入线路 8-9
7	10	恢复负荷 10、投入线路 9-10
8	11	恢复负荷 11、投入线路 10-11
9	12	恢复负荷 12、投入线路 11-12
10	13	启动电源 3、投入线路 12-13
11	14	恢复负荷 14、投入线路 13-14
12	15	恢复负荷 15、投入线路 14-15
13	16	恢复负荷 16、投入线路 15-16
14	17	恢复负荷 17、投入线路 16-17
15	18	启动电源 4、投入线路 17-18
16	33	启动电源 6、投入线路 18-33
17	32	投入线路 32-33
18	31	恢复负荷 31、投入线路 31-32
19	3	恢复负荷 3、投入线路 2-3
20	4	恢复负荷 4、投入线路 3-4
21	5	恢复负荷 5、投入线路 4-5
22	6	恢复负荷 6、投入线路 5-6
23	7	恢复负荷 7、投入线路 6-7
24	22	恢复负荷 22、投入线路 21-22
25	23	恢复负荷 23、投入线路 3-23
26	24	恢复负荷 24、投入线路 23-24
27	25	恢复负荷 25、投入线路 24-25
28	30	恢复负荷 30、投入线路 30-31
29	29	恢复负荷 29、投入线路 29-30、投入线路 25-29
30	28	恢复负荷 28、投入线路 28-29
31	27	恢复负荷 27、投入线路 27-28
32	26	恢复负荷 26、投入线路 26-27、投入线路 6-26
33	1	恢复负荷 1、投入线路 1-2

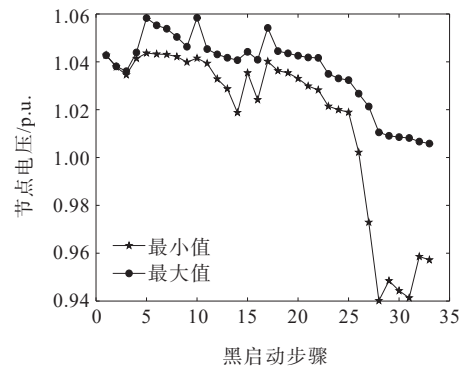


图 7 黑启动组网过程中节点电压的最大、最小值

Figure 7 Maximum and minimum of nodal voltage in intending island self-organizing network process

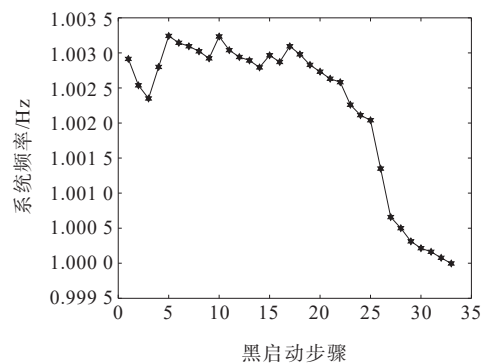


图 8 黑启动组网过程中系统频率

Figure 8 Maximum and minimum of branch current in intending island self-organizing network process

7 结语

本文提出了多源配电网主动孤岛策略与动态组网潮流分析方法,根据不同类型 DG 及重要负荷的分布,以最小路径权值和最大重要负荷恢复量为目标,建立大停电初期的配电网孤岛黑启动方案的最优化模型,利用 MHSa 生成大停电初期的孤岛微电网黑启动方案,再由负荷的重要性程度依次恢复剩余负荷。充分发挥 BFGS 信赖域算法收敛速度快、计算精度高的优点,求解无平衡节点孤岛配电网黑启动过程中的动态组网潮流,得到组网过程中的节点电压及系统频率数据,以此来判断黑启动方案的合理性。对改进 IEEE 33 节点配电系统进行算例仿真与分析表明:

1) BFGS 信赖域算法适用于求解孤岛配电网黑启动组网过程的动态潮流变化问题,可简单、直

观地评估DG主导的孤岛配电网黑启动序列的有效性,丰富了黑启动潮流计算评价体系;

2) 通过与PSO进行对比分析,验证了本文提出的HSA能够更快地搜索到最优DG启动及负荷恢复序列;

3) 对于黑启动初期恢复方案,应按照负荷重要程度生成黑启动中后期组网方案,以最大化保障关键负荷供电,降低停电损失。

参考文献:

- [1] 叶茂,刘艳,顾雪平等.基于动态风电穿透功率极限的黑启动方案制定[J].中国电机工程学报,2018,38(3):744-752.
YE Mao, LIU Yan, GU Xueping, et al. Black start scheme formation considering dynamic wind power penetration limit[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 744-752.
- [2] 方勇杰.英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J].电力系统自动化,2019,43(24):1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.
- [3] 孙华东,许涛,郭强等.英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [4] 别朝红,林雁翎,邱爱慈.弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(22):1-9.
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [5] 许寅,和敬涵,王颖等.韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J].电工技术学报,2019,34(6):3416-3429.
XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [6] 王大江,顾雪平,贾京华.一种扩展黑启动方案恢复效果的评估方法[J].电网技术,2014,38(12):3360-3365.
WANG Dajiang, GU Xueping, JIA Jinghua. A method to access restoration effect of extended black-start scheme[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3360-3365.
- [7] 冷亚军,刘鹏飞,时浩.考虑不完全信息的电力系统黑启动方案评估方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):99-109.
LENG Yajun, LIU Pengfei, SHI Hao. Evaluation method of power system black start scheme considering incomplete information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 99-109.
- [8] 刘艳,顾雪平,张丹.基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J].中国电机工程学报,2006,26(5):32-37+94.
LIU Yan, GU Xueping, ZHANG Dan. Relative effectiveness evaluation of power system black start scheme based on data envelopment analysis model[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 32-37+94.
- [9] BRETAS A S, PHADKE A G. Artificial neural networks in power system restoration[J]. IEEE Transactions Power Delivery, 2003, 18(4): 1181-1186.
- [10] EL-ZONKOLY A M. Renewable energy sources for complete optimal power system black-start restoration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(6): 531-539.
- [11] ZHAO Y, LIN Z, DING Y, et al. A model predictive control based generator start-up optimization strategy for restoration with microgrids as black-start resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7189-7203.
- [12] 陈亮,顾雪平,李文云等.考虑恢复安全裕度的扩展黑启动方案多目标优化与决策[J].电力系统自动化,2014,38(7):39-46.
CHEN Liang, GU Xueping, LI Wenyun, et al. Multi-objective optimization and decision-making of extended black-start schemes considering restoration security margin[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 39-46.
- [13] 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.
- [14] 谢惠惠,汪沅,卢鸣凯等.大停电后初期基于分布式电源的配电网局部自我恢复方案[J].电网技术,2013,37(7):1834-1840.
XIE Xiahui, WANG Feng, LU Mingkai, et al. A distributed

- generation-based local self-recovery scheme for distribution network at post-blackout early stage of power grid restoration[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(7): 1834-1840.
- [15] 穆世霞. 微电源模型及微电网潮流与短路计算分析[D]. 北京:华北电力大学,2009.
MU Shixia. Model of microsourses and analysis of load flow and short circuit calculation for microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [16] ELTANTAWY A, SALAMA M. A novel zooming algorithm for distribution load flow analysis for smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(4): 1704-1711.
- [17] CATALIOTTI A, COSENTINO V, DI CARA D, et al. An innovative measurement approach for load flow analysis in MV smart grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 889-896.
- [18] 彭寒梅,曹一家,黄小庆. 基于BFGS信赖域算法的孤岛微电网潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2629-2638.
PENG Hanmei, CAO Yijia, HUANG Xiaoqing. Power flow calculation of islanded microgrids based on BFGS trust region method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2629-2638.
- [19] BALAMURUGAN K, DIPTI S. Review of power flow studies on distribution network with distributed generation [C]//*IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, Singapore, 2011.
- [20] GU W, LI L, DING T, et al. An affine arithmetic-based algorithm for radial distribution system power flow with uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, 25(2): 624-632.
- [21] 顾雪平,白岩松,李少岩,等. 考虑风电不确定性的电力系统恢复全过程两阶段鲁棒优化方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(21): 5462-5477.
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Two stage robust optimization method for the whole-process power system restoration considering wind power uncertainty[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(21): 5462-5477.
- [22] 刘迪,张强,吕干云. 量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(3): 58-65.
LIU Di, ZHANG Qiang, LÜ Ganyun. Improvement and application of quantum-behaved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(3): 58-65.
- [23] 杨丽君,赵宇,赵优,等. 考虑交通路网应急电源车调度的有源配电网故障均衡恢复[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 170-180.
YANG Lijun, ZHAO Yu, ZHAO You, et al. Balanced fault recovery of active distribution network considering emergency power supply vehicle scheduling in traffic network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 170-180.
- [24] 景皓,李璠,卢志刚,等. 基于主从博弈理论的含分布式发电的主动配电网故障恢复方法[J]. *智慧电力*, 2021, 49(5): 77-84.
JING Hao, LI Fan, LU Zhigang, et al. Active distribution network fault recovery method with distributed generation based on master-slave game theory[J]. *Smart Power*, 2021, 49(5): 77-84.
- [25] 王海英,黄强,李传涛,等. 图论算法及其MATLAB实现[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2010:21.
WANG Haiying, HUANG Qiang, LI Chuantao, et al. Graph theory algorithm and its MATLAB implementation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 21.
- [26] GEEM Z W, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. *Simulation-transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 2001, 76(2): 60-68.
- [27] 张哲,杨晓平,封磊,等. 面向中压直流配电网的直流变压器设计与优化[J]. *高压电器*, 2022, 58(11): 248-254.
ZHANG Zhe, YANG Xiaoping, FENG Lei, et al. Design and optimization of DC transformer for medium-voltage DC distribution network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(11): 248-254.