

基于供电可靠性的微电网规划

曹智平¹, 周力行¹, 张艳萍², 刘家郡¹, 范彬¹

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 甘肃省电力公司武威供电公司, 甘肃 武威 733000)

摘要: 微电网作为一种能够实现自我控制、保护和管理的自治系统, 既可并网运行, 亦可孤立运行, 能极大地提高负荷的供电可靠性。提出一种以提高配电网供电可靠性为目标的多阶段决策的微电网规划方法, 较之传统方法有效避免了耗时过长、难以求解的缺点。其中阶段一为根据故障遍历影响矩阵对系统进行可靠性评估, 找出可靠性不满足要求的负荷点。阶段二为针对阶段一中搜索到的负荷节点, 利用节点邻接矩阵确定微电网的位置以及数目。阶段三以电压偏移及网络损耗最小为目标函数, 并利用具有全局搜索能力的和声算法进行求解, 确定分布式电源在所有微电网中的容量。为了提高算法的稳定性及避免陷入局部最优, 采用动态和声记忆库的选择概率和扰动概率, 随迭代次数的增加而变化, 并基于拥挤度距离选取和声记忆库内的解。以 RBTS-BUS 6 作为算例的仿真结果验证了该方法的有效性与合理性。

关键词: 微电网; 供电可靠性; 多阶段决策; 和声算法

Micro-grid planning based on supply reliability

CAO Zhiping¹, ZHOU Lixing¹, ZHANG Yanping², LIU Jiajun¹, FAN Bin¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. Wuwei Power Supply Company, Gansu Electric Power Company, Wuwei 733000, China)

Abstract: Micro-grid is an autonomous system of self-control, protection and management. It can operate both jointly and separately and improve the reliability of power supply to a great extent. This paper provides a multi-stage decision planning method for micro-grid, less time-consuming and easier to solve in comparison with the traditional method, aiming at the promotion of the reliability of power supply of the distribution network. At the first phase, according to the fault traversal influence matrix, a reliability evaluation is implemented on the system to find out the load point which can't meet the requirement for reliability. At the second phase, the position and number of micro-grid are confirmed by node adjacent matrix on the basis of the load point searched at the first phase. At the third phase, with the voltage deviation and minimum network loss as the objective functions and calculated by harmony search with global searching ability, the capacity of distributed generation in all micro-grids are defined. In order to improve the stability of the algorithm and avoid falling into local optimum, dynamic memory choice probability and disturbance probability of harmony search are used, changing with the increase of the number of iterations, and the solutions of harmony memory is selected based on crowded degree distance. The effectiveness and rationality of this method are verified by simulation results of RBTS-BUS 6-bus system.

Key words: micro-grid; supply reliability; multi-stage decision; harmony search

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0010-06

0 引言

微电网作为一个将负荷、分布式电源(DG)、储能装置与控制装置等集于一体的独立可控单元, 不

仅可以并网运行, 支持当地电压, 降低输电损耗等, 还可以在系统故障时, 脱网孤岛运行, 保障微电网内关键负荷供电, 以提高系统的供电可靠性^[1-3]。

由于大部分 DG 利用可再生能源发电, 如风能、太阳能等, 因此, 微电网的接入在提高系统安全稳定性的同时, 还具有节约能源和环境友好的特点^[4-5]。现有研究已表明, 将分布式发电以微电网的形式接

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(10JJ5059); 湖南省教育厅科学研究重点项目(10A106)

入公共电网运行, 与公共电网互为支撑, 是发挥分布式电源效能的最有效方式。

目前, 关于微电网规划的研究已有很多, 可分为孤岛级^[6-7]与系统级^[8-12]的规划。文献[8]以电压改善和网络损耗为目标, 并利用二进制粒子群优化算法和具有量子行为的粒子群优化算法对规划模型进行求解。文献[9]以供电可靠性为目标进行微电网规划。文献[10]从节能环保的角度, 以 DG 安装容量最大为目标, 用改进的粒子群算法求解模型, 且对不同的资源参数、置信水平以及风-光接入比的微电网电源的规划进行了仿真研究。文献[11]综合考虑网络约束、运行安全约束、可靠性约束、潮流约束, 以网络年费用最小为优化目标, 并纳入分布式电源和负荷的时序特性, 建立了考虑用户停电损失的微电网架规划模型。文献[12]提出了电力市场环境下的微电网规划问题, 以不可再生分布式发电容量的配置成本与实施风险之和最小为目标, 以获取兼顾经济性与可靠性的不可再生分布式发电容量配置方案。上述方法未同时全面考虑微电网对系统供电可靠性、电压质量、网络损耗及线路负载率等各方面的影响, 与实际应用有差距。

针对当前配电网进行可靠性分析, 对于可靠性指标比较低的负荷点, 考虑接入分布式电源组成微电网, 以提高系统的供电可靠性。本文首先充分考虑微电网对系统各方面的影响, 根据可靠性评估确定可靠性较低的负荷节点; 然后根据节点邻接矩阵, 将负荷节点有连接关系的进行合并; 最后计及电压偏移以及网络损耗以确定微电网的 DG 容量。

1 微电网规划数学模型

微电网的接入容量直接影响到配电网的供电可靠性、电能质量和经济性等方面。同时, 也受到配电网节点电压最大偏移、线路最大传输功率等的约束。将整个微电网的规划等效为多阶段决策优化问题, 流程如图 1 所示。

阶段一: 确定不满足可靠性指标的负荷节点。

阶段二: 根据节点邻接矩阵确定微电网的数目以及连接范围。

阶段三: 确定微电网的 DG 容量。阶段三计及了节点电压偏移以及网络损耗, 取二者的加权最小作为优化目标。

平均节点电压偏移与最大节点电压偏移之和。

$$F_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_i - 1| + \max \{|V_i - 1|\}, i \in G \quad (1)$$

式中: V_i 表示节点 i 的电压标么值; N 为系统节点

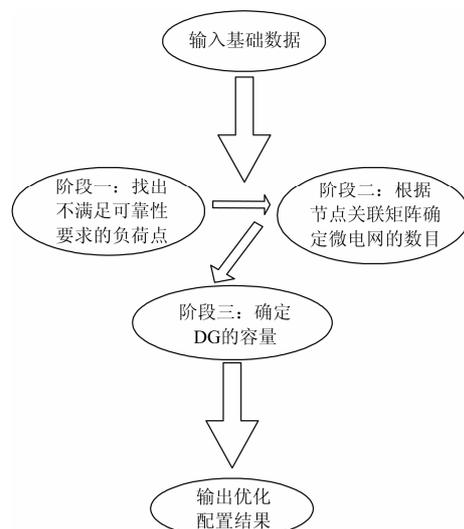


图 1 微电网规划流程

Fig. 1 Process of micro-grid optimal allocation

数目; G 表示系统中节点的集合。

$$F_2 = \sum_{l=1}^{N_l} r_l \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} \quad (2)$$

式中: N_l 表示系统中支路总数; r_l 表示支路 l 的电阻值; P_l 和 Q_l 分别表示支路 l 流经的有功值和无功值; U_l 表示支路 l 的末端节点电压值。

$$\min F = \alpha F_1 + 10\beta F_2 / \sum_{i=1}^N P_i \quad (3)$$

式中: α 、 β 分别为系数, 本文取两者都是 0.5; P_i 为负荷节点 i 的有功功率值。

微电网接入配电网的约束条件可分为等式约束和不等式约束两个方面。其中, 等式约束为潮流约束, 如式(4)。

$$\dot{U}_i \sum_{j \neq i} Y_{ij}^* \dot{U}_j^* = P_i + jQ_i \quad (4)$$

式中: $P_i + jQ_i$ 为节点 i 的注入功率; \dot{U}_i 和 \dot{U}_j 为节点 i 、 j 的电压; Y_{ij} 为节点 i 、 j 间的互导纳。

不等式约束包括线路容量约束和节点电压约束, 具体如式(5)。

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ S_l \leq S_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: V_i 表示节点 i 的实时电压值; V_{\max} 和 V_{\min} 分别表示节点 i 的电压上下限; S_l 表示支路 l 的实时传输功率; S_{\max} 表示支路 l 的传输功率上限。

DG 的出力约束, 要求 DG 的出力大于等于微电网内负荷的总量。

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Li} \leq P_{Gn} \leq P_{G \max} \quad (6)$$

式中： N_g 为第 n 个微电网内负荷节点的数目； $P_{G \max}$ 为国标所允许的单个微电网内 DG 的最大容量。

2 可靠性评估方法

配电网的供电可靠性取决于发生故障后的失电负荷大小与停电时间，这与恢复故障的开关种类、元件故障率及故障传播范围相关。针对网络中的所有元件进行故障遍历，逐一分析其对各个负荷的供电影响，综合可得整个系统的可靠性指标^[9]。

2.1 网络简化

将配电网简化为节点与边的简单网络图。考虑到配电网故障后，需要通过开关的开合对失电负荷进行转供，所以简化图中以开关为边，开关闭合则边连通，开关断开则边不连通。节点包括电源节点、负荷节点以及不包含开关、电源与负荷的最小区域的连接节点。以图 2 所示配电网为例进行说明。其中： S 为主电源； AS 为备用电源； F 为熔断器； QF 为断路器； QS 为手动开关， QS_1 与 QS_2 为常闭开关， QS_3 为常开开关； L_A 、 L_B 与 L_C 为负荷。简化后的网络图如图 3 所示， S_1 与 S_2 为电源节点， C_1 、 $C_2 \dots C_7$ 为连接节点， L_1 、 L_2 与 L_3 为负荷节点。

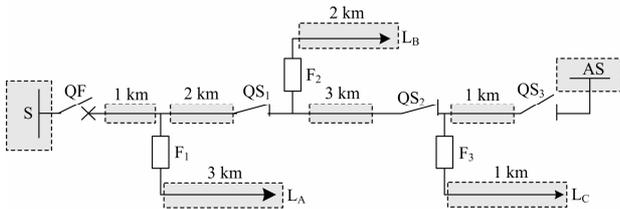


图 2 辐射状配电网网络图

Fig. 2 Radiation diagram of distribution network

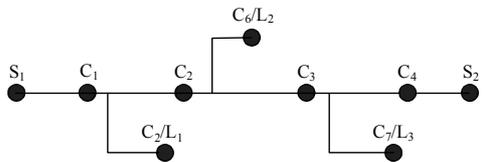


图 3 辐射状配电网简化图

Fig. 3 Simplified radiation diagram of distribution network

2.2 故障遍历影响矩阵

为了便于分析连接节点故障对负荷供电可靠性的影响，提出故障遍历影响矩阵的概念。在含 m 个负荷节点、 n 个连接节点的简化网络，故障遍历影响矩阵为 $H = (h_{ij})_{m \times n}$ ，其中， h_{ij} 表示连接节点 C_i 发生故障后，负荷节点 L_j 受到的影响，其具体取值如

式(7)。

$$h_{ij} = \begin{cases} 0 & \exists \text{自动开关隔离、恢复故障} \\ 1 & \exists \text{手动开关隔离、恢复故障} \\ 2 & \text{不能与任何电源连通} \end{cases} \quad (7)$$

2.3 评估步骤

当微电网接入之后，改变了微电网内部负荷的故障遍历影响值，需要对原始故障遍历影响矩阵进行改进。接入微电网的配电网可靠性评估具体步骤如下所示：

1) 对配电系统进行网络简化。

2) 对各连接节点进行故障遍历，分析其对所有负荷节点产生的影响，生成原始故障遍历影响矩阵 H_1 。

3) 确定微电网包含的节点与边。假设微电网内部的开关全为自动型。

4) 将 H_1 中微电网内部负荷节点对应的行全部置零。

5) 遍历微电网内各连接节点故障对所有负荷的影响，生成含微电网的故障遍历影响矩阵 H_2 。

基于生成的故障遍历影响矩阵，负荷 L 的年停电时间 T_a 可根据式(8)进行计算。

$$T_a = \sum_{f=1}^F \lambda_f (t_{QS} k_{1,h_{ij}} + t_f k_{2,h_{ij}}) \quad (8)$$

式中： F 表示连接节点总数，即故障遍历影响矩阵的列数； λ_f 表示连接节点 f 平均年故障率； t_{QS} 表示手动开关的操作时间； t_f 表示故障修复所需时间； $k_{1,h_{ij}}$ 的取值如下：

$$\begin{aligned} & \text{if } h_{ij} = 1 \\ & k_{1,h_{ij}} = 1; \\ & \text{else} \\ & k_{1,h_{ij}} = 0; \\ & \text{end} \end{aligned}$$

$k_{2,h_{ij}}$ 的取值如下：

$$\begin{aligned} & \text{if } h_{ij} = 2 \\ & k_{2,h_{ij}} = 1; \\ & \text{else} \\ & k_{2,h_{ij}} = 0; \\ & \text{end} \end{aligned}$$

3 算法实现

通过阶段一的可靠性评估，得出可靠率较低的负荷节点，然后针对这些负荷，利用节点邻接矩阵可获得微电网 PCC 的数目及微电网的负荷容量，并

以电压偏移和网络损耗为目标采用和声算法求解微电网中 DG 容量。

3.1 微电网数目的确定

对于实际的配电网接线图进行简化, 简化原则为将变压器等效为连接支路上的节点, 图 4 为简化示例。

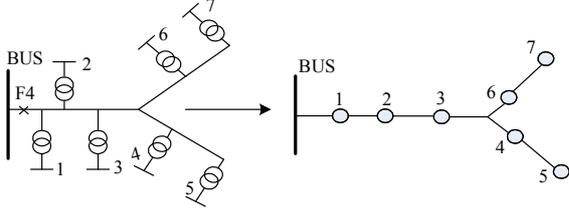


图 4 拓扑简化示例

Fig. 4 Topology simplified example

对于阶段一所确定的负荷节点集为 $C = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$, 根据拓扑连接关系进行负荷节点合并, 将其中相同电压等级两两相邻的负荷节点进行合并组成微电网, 合并后确定微电网的数目。

邻接矩阵(Adjacency Matrix): 表示顶点之间相邻关系的矩阵。设 $G = (V, E)$ 是一个图, 其中 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 定义节点邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$, 其中 A 的生成过程见图 5。图 4 所示拓扑的矩阵 A 为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

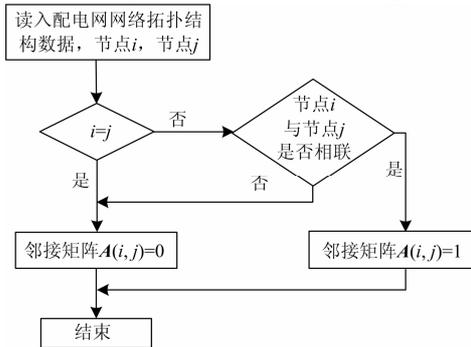


图 5 节点邻接矩阵的生成过程

Fig. 5 Generation process of node adjacency matrix

确定微电网数目的步骤如下:

1) 遍历向量 C , $i=1$, 且定义矩阵 M (其中 M 的每一行存储一个微电网中所包含的负荷节点)。

2) 取出矩阵 A 的第 L_i 行赋值于矩阵 B , 且将 L_i 存储于矩阵 M 的第 i 行第 1 列, 将 L_i 从矩阵 C 中删除。

3) 将矩阵 B 中值为 1 的元素的列号赋值给矩阵 D , 遍历矩阵 D , 若 $D(j) \in C$, 则将 $D(j)$ 赋于 M 的第 i 行, 且将 $D(j)$ 于 C 中删除; 按照步骤 2) 的方法继续搜索, 找与 $D(j)$ 相关联的负荷节点, 依次类推, 直到找不到直接关联的节点, 将所有找到的关键负荷节点存储于 M 的第 i 行中, 同时从 C 中删除, D 矩阵遍历结束。

4) $i=i+1$, 同时计算 C 中元素的数目。

5) 若 C 的元素数目为 0, 则微电网的数目确定结束, 其中矩阵 M 的行数即为微电网的个数, 每一行的非零元素为相应微电网所包含的负荷节点编号。

3.2 微电网中 DG 容量的确定

本文采用整数编码的形式确定 DG 的容量, 其中编码的规则满足以下要求:

1) 编码形式中解的维数与已确定微电网的数目相同。

2) 微电网中 DG 的出力满足约束条件式(6)的约束条件。

3) 编码形式如式(9)所示。

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (9)$$

式中: X 为解; x_i 为第 i 个微电网的 DG 容量。

3.3 和声记忆库中解的选择策略

每次生成新解后都需要对和声记忆库 HM 进行更新, 将非支配解存放于 HM 。若非支配解的个数大于和声记忆库大小 HMS 时, 对非支配个体按拥挤距离从大到小的顺序存放于 HM 。拥挤度距离的计算公式如下。

$$d_i = \sum_{j=1}^N \frac{d_{ij}^1}{d_{ij}^2} \times \beta_j \quad (10)$$

$$\beta_j = \begin{cases} 2 \times \delta_j / d_{ij}^3 & \text{if } 2 \times \delta_j \leq d_{ij}^3 \\ d_{ij}^3 / 2 \times \delta_j & \text{if } d_{ij}^3 \leq 2 \times \delta_j \end{cases} \quad (11)$$

$$d_{ij}^3 = d_{ij}^1 + d_{ij}^2 \quad (12)$$

$$\delta_j = \frac{f_j^{\max} - f_j^{\min}}{HMS - 1} \quad (13)$$

式中: d_{ij}^1 和 d_{ij}^2 表示在目标函数 j 上个体 i 与其最近的两点间的距离, 且 $d_{ij}^1 \leq d_{ij}^2$; f_j^{\max} 和 f_j^{\min} 分别表示目标函数 j 的最大值与最小值。

3.4 具体步骤

1) 参数设置。包括记忆库大小 HMS ; 记忆库选

择概率的上下界 $HMCR_{max}$ 和 $HMCR_{min}$; 扰动概率的上下界 PAR_{max} 和 PAR_{min} ; 最大迭代次数 N_{dd} 。

2) HM 初始化。

3) 更新 $HMCR$ 和 PAR 。按下式计算:

$$HMCR = HMCR_{max} - \frac{HMCR_{max} - HMCR_{min}}{N_{dd}} \times k \quad (14)$$

$$PAR = PAR_{min} + \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{N_{dd}} \times k \quad (15)$$

式中, k 为当前迭代数。

4) 生成新解。

5) 更新 HM 。

6) 判断迭代次数是否达到 N_{dd} , 若是, 停止计算, 输出最优解; 否则, 转至步骤 3)。

4 算例分析

本文以 RBTS-BUS 6^[7]系统为算例, 验证本方法的有效性 with 合理性。系统包含 1 条 33 kV 馈线、3 条 11 kV 馈线、64 条线路、40 个负荷。根据用户类型对负荷进行等级划分, 商业及小工业用户为一级负荷, 居民用户为二级负荷, 农场用户为三级负荷, 具体情况见表 1。

表 1 系统负荷等级
Table 1 System load level

负荷等级	负荷点
一级	14~17
二级	1~13、18~19、22~23、25、27~29、31、33、36、39
三级	20~21、24、26、30、32、34~35、37~38、40

系统中元件的故障历史统计参数见表 2。Pareto 和声算法的参数设置如下: 记 $HMS=10$, $HMCR_{max}=0.9$, $HMCR_{min}=0.2$, $PAR_{max}=1$, $PAR_{min}=0.6$, $N_{dd}=100$ 。

表 2 系统元件故障参数

Table 2 System component failure parameters

参数类型	参数值
线路故障率	0.065 次/(a·km)
每段线路平均修复时间	5 h
变压器故障率	0.015 次/a
变压器修复时间	200 h
切换到备用变压器时间	1 h
手动开关操作时间	1 h
联络开关倒闸时间	1 h

根据阶段一的评估下列负荷节点的年故障停电率、年停电时间和停电成本均较大: 14、15、16、17、28、29、30、31、32、33、34、35、36、37、

38、39、40。

阶段二的微电网确定结果为微电网数目为 3, 分别为(14、15、16、17), (31、32、33、34、35), (28、29、30、37、38、39、40)。

利用本方法对算例进行微电网规划的结果见表 3。结果显示共配置 3 个微电网, 第一个微电网覆盖负荷 14~17, 接入容量为 4.75 MW; 第二个微电网覆盖负荷 28~30, 接入容量为 1.12 MW; 第三个微电网覆盖负荷 31~35 以及 37~40, 接入容量为 3.79 MW。具体接入情况见图 6。

表 3 微电网规划结果

Table 3 Configuration of micro-grid optimal allocation

微电网编号	微电源容量/MW	覆盖负荷
1	4.75	14~17
2	1.12	28~30
3	3.79	31~35, 37~40

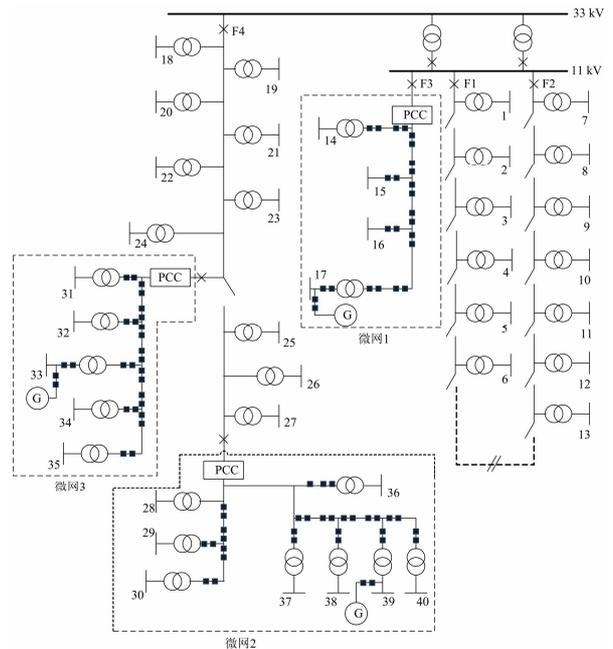


图 6 RBTS-BUS 6 微电网规划结果

Fig. 6 Configuration of micro-grid optimal allocation

配置微电网前后的指标对比情况见表 4。可知配置后的负荷年停电时间由 6.669 1 h/a 下降到 5.639 3 h/a; 平均节点电压偏移与最大节点电压偏移之和从 0.086 9 减少到 0.048 7; 网络损耗由 0.75 MW 减少到 0.34 MW。

表 4 微电网配置前后指标对比

Table 4 Comparison of indices with and without micro-grids

情况	电压指标/p.u.	负荷年停电时间/(h·a ⁻¹)	网络损耗/MW
微电网配置前	0.086 9	6.669 1	0.75
微电网配置后	0.048 7	5.639 3	0.34

5 结语

本文提出了基于多阶段决策的微电网规划方法, 避免了求解多目标算法时耗时过长难以寻解的情况。以供电可靠性、电压偏移及网络损耗为研究对象, 并采用自适应和声算法求解, 有利于搜索全局最优, 有效解决了微电网的接入位置以及微电源的容量配置问题。以 RBTS-BUS 6 系统为算例验证了本文方法, 对比结果显示, 利用多阶段决策方法规划微电网可以提高系统的供电可靠性, 改善电压质量及减少有功损耗, 显示了一定的工程应用价值。

参考文献

- [1] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.
- [2] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [3] 吴为民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [4] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 235-239.
SU Ling, ZHANG Jianhua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 235-239.
- [5] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 267-273.
YANG Qi, MA Shiyong, LI Sheng, et al. Design of microgrid operation model and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 267-273.
- [6] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Optimal sizing of hybrid solar-wind distributed generation in an islanded microgrid using improved bacterial foraging algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 17-25.
- [7] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39.
LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.
- [8] 王兆宇, 艾芊. 智能配电网中微电网的多目标优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 199-203.
WANG Zhaoyu, AI Qian. Multi-objective allocation of micro-grid in smart distributed network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 199-203.
- [9] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 基于可靠性评估的微电网配置方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 73-77.
MA Xiyuan, WU Yaowen, FANG Hualiang, et al. Allocation of microgrid based on reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 73-77.
- [10] 潘华, 刘翠琳, 王树朋. 并网模式下的微电网电源优化配置研究[J]. 广东电力, 2013, 26(8): 51-55.
PAN Hua, LIU Cuilin, WANG Shupeng. Study on optimal configuration of power supply of micro grid with in-grid mode[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(8): 51-55.
- [11] 郭贤, 郭贺, 程浩忠, 等. 考虑用户停电损失的微电网网架规划[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 301-308.
GUO Xian, GUO He, CHENG Haozhong, et al. Optimal architecture planning of microgrid considering user outage costs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 301-308.
- [12] 罗运虎, 王冰洁, 梁昕, 等. 电力市场环境下载电容量不可再生分布式发电容量的优化配置问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 28-36.
LUO Yunhu, WANG Bingjie, LIANG Xin, et al. Configuration optimization of non-renewable energy distributed generation capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 28-36.
- [13] 陈莹珍, 高岳林. 多目标自适应和声搜索算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(31): 108-111.
CHEN Yingzhen, GAO Yuelin. Multi-objective self-adaptive harmony search algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(31): 108-111.
- [14] 刘思远, 柳景青. 一种新的多目标改进和声搜索优化算法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(34): 27-30.
LIU Siyuan, LIU Jingqing. Novel improved multi-objective harmony search optimization algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(34): 27-30.

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2015-01-07

作者简介:

曹智平(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能配电网运行优化控制的研究; E-mail: caozhiping77@163.com

周力行(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电气设备状态监测与故障诊断的研究。E-mail: zlxztwyr@163.com

(编辑 魏小丽)