

考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构

李奔¹, 刘会家¹, 李珺²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了提高配电网的供电可靠性, 从网络自然连通性角度, 引入网络抗毁性指标作为配电网重构的一个新目标函数。同时考虑风电出力的随机性与间歇性, 根据风速区间及风速概率密度函数构建多个风电出力随机变量, 以及对应概率。在此基础上, 以开关状态为优化变量、风电出力为随机变量以及在置信水平下的网络损耗最小为另一个目标函数建立了基于机会约束规划的含风电的配电网多目标重构模型。应用改进蚁群算法, 结合生成树策略保证蚂蚁路径满足网络辐射状网络拓扑约束, 求解所建配网重构模型, 并利用 Pareto 寻优得到最优解集。IEEE33 节点和 PG&E69 节点系统算例仿真结果验证了该模型和算法的有效性。

关键词: 配电网重构; 网络抗毁性; 机会约束规划; 蚁群算法; Pareto 最优解

Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability

LI Ben¹, LIU Huijia¹, LI Jun²

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To improve the reliability of power supply distribution network, network survivability index is introduced as a new objective function of the distribution network reconfiguration, from the point of network connectivity. At the same time, considering the randomness and intermittent of the output of the wind power generations (WPG), this paper builds up wind power output random variables and their corresponding probability based on wind speed and wind speed probability density function. On this basis, taking the switch state as optimization variables, the output of WPG as random variables, the minimum network loss higher than confidence level as another objective function, a chance constrained programming based distribution network multi-objective reconfiguration model with WPG is built. It applies the improved ant colony algorithm, combines with the strategy of spanning tree which ensure that the ants path to meet the structure of the distribution network, to solve the built model. And then, the Pareto optimality is used to evaluate the result to get the optimal solution set. The results of IEEE33 system and PG&E69 system verify the validity of the model and algorithm.

Key words: distribution network reconfiguration; network survivability; chance constrained programming; ant colony algorithm (ACO); Pareto optimality

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)17-0057-06

0 引言

电网可靠性和经济性是配电网重构研究中两个重要指标。在配电网重构具体研究中, 一般是以网络损耗最小、负荷平衡、提高电压水平等^[1-2]为目标函数, 通过切换联络开关和分段开关的开/合状态来改变网络的拓扑结构, 以达到配电网优化的目的。文献[2]以降低网损和提高节点电压为目标函数, 认

为可靠性是该目标函数优化后必然结果。文献[3]考虑可靠性指标系统平均停电频率、平均供电不可靠率, 建立了兼顾可靠性和经济性的配网重构模型, 但是可靠性指标计算时间较长, 使得优化重构过程繁琐。

同时, 随着越来越多分布式电源 (DG), 特别是出力具有随机性、间歇性的 DG 接入配电网, 给配电网重构带来了新的问题, 主要包括如何建立考虑

DG 出力随机性的配电网重构模型以及如何求解含 DG 配电网重构问题。文献[4]提出利用场景分析法来描述风电出力随机性,建立了基于场景分析法的配电网重构模型。文献[5]针对场景分析法不能很好地模拟风电出力随机性这一问题,应用多状态系统理论来描述不可控 DG 的出力随机特性,建立基于机会约束规划的配电网重构模型。对于含 DG 的配电网重构算法上,近年来出现了一些行之有效的智能优化算法,如遗传算法^[6]、粒子群算法^[7]、蚁群算法^[8]等。其中,蚁群算法不需要初始可行解,算法具有良好的正反馈特性。但是其易陷入局部最优,全局搜索优化能力较差。

基于上述,本文引入网络抗毁性指标^[9]作为一个新的目标函数,研究考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构问题。根据风速区间及风速概率函数,构建多个风电出力随机变量,用来表征风电出力的随机性,并建立了基于机会约束规划的配电网多目标重构模型。最后,针对蚁群算法易陷入局部最优的缺点,对蚁群算法进行改进并求解所建配电网重构模型。

1 基于自然连通度的配电网网络抗毁性

1.1 配电网网络抗毁性必要性

如引言部分中所述,配电网重构文献中很少有考虑网络抗毁性。然而随着配电网网络规模的不断扩大、用户对安全可靠供电的要求不断提高,应用网络抗毁性分析方法,对配电网进行抗毁性分析研究,对配电网网络结构优化具有非常重要的现实意义。本文基于自然连通度的角度分析网络抗毁性,分析重构过程中网络拓扑结构的安全性和可靠性,抵御破坏的能力。

1.2 配电网网络抗毁性

考虑到配电网网络拓扑连接关系的强稀疏性,配电网网络抗毁性是从网络的拓扑连接关系出发,以整个网络结构可替代路径的冗余性作为抗毁性的度量,是衡量网络可靠性的一项静态指标。

1) 最短路径

配电网可以抽象为一个由节点集 V 和边集 E 组成的图 $G=(V,E)$ 。连接节点 i 与 j 的路径中边数最少称为最短路径。

2) 等效最短路径数

如文献[10]中,定义节点 i 与节点 j 之间的等效最短路径数为

$$e_{ij} = \frac{m_{ij}}{\mu(K_{ij})} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 为图 G 中节点 i 与节点 j 之间最短路径的长度; m_{ij} 为图 G 中节点 i 与节点 j 之间长度为 K_{ij} 的最短路径的条数; $\mu(K_{ij})$ 为在与图 G 具有相同节点数的全通网络中,节点 i 与节点 j 之间路径长度不大于 K_{ij} 的路径条数。

3) 网络抗毁性指标

基于自然连通度的网络抗毁性指标为

$$Inv = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N e_{ij}}{N(N-1)/2} \quad (2)$$

式中, N 为网络节点数。物理意义:分子部分为网络 G 中所有节点之间的等效最短路径数之和;分母部分为网络 G 对应的全网络 G_0 所有节点之间的等效最短路径数。该比值代表待评价网络结构与对应全网络结构的差异。全网络网络抗毁性指标 $Inv(G_0)=1$, 重构过程中待评价网络的抗毁性指标 $0 < Inv(G) < 1$, $Inv(G)$ 越大,代表待评价网络结构越紧凑,抗毁性越强。

2 基于机会约束规划的含风电的配电网多目标重构优化模型

2.1 机会约束规划^[5]

机会约束规划是充分考虑随机变量的影响,允许一定程度上不满足约束条件,但约束条件成立的概率不小于某一置信水平,其常见数学表达为

$$\begin{cases} \min \bar{f} \\ \text{s.t. } p(f(x, \xi) \leq \bar{f}) \geq \alpha \\ p(g(x, \xi) \leq 0) \geq \beta \end{cases} \quad (3)$$

式中: x 为一个 n 维决策向量; ξ 表示随机向量; $f(x, \xi)$ 为决策向量和随机向量下的目标函数; α 、 β 分别为目标函数和约束条件的置信水平; \bar{f} 为目标函数成立满足置信水平下的最小值。

2.2 风力发电出力随机性

如文献[4]中,风电机组的输出功率模型为

$$P = \begin{cases} 0, & v < v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \\ k_1 + k_2 v, & v_{ci} < v < v_r \\ P_r, & v_r < v < v_{co} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_{ci} 、 v_r 、 v_{co} 为风机切入风速、额定风速,切出风速; P_r 为风机额定输出功率; $k_1 = P_r v_{ci} / (v_{ci} - v_r)$; $k_2 = P_r / (v_r - v_{ci})$ 。

模拟风速的分布模型较多,本文基于威布尔(Weibull)分布进行分析,其密度函数为

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (5)$$

式中, k 、 c 为风机的形状参数和尺度参数。

由式(4)、式(5)可知

当 $v < v_{ci}$ 或 $v > v_{co}$ 时, 风机出力 $P = 0$, 对应概率 $p_1 = \int_0^{v_{ci}} f(v)dv + \int_{v_{co}}^{+\infty} f(v)dv$ 。

当 $v_{ci} < v < v_{co}$ 时, 风机出力 $P = P_r$, 对应概率 $p_2 = \int_{v_{ci}}^{v_{co}} f(v)dv$ 。

当 $v_{ci} < v < v_{ci}$ 时, 风机出力是变化的, 对此根据风速区间 $v \sim v+1$ (设定区间长度为 1 m/s), 由式(4)求得风机出力 $P = k_1 + k_2(v+v+1)/2$, 对应概率 $p_i = \int_v^{v+1} f(v)dv$ 。所以考虑风电出力随机性, 根据风速构建了风电出力随机变量, 及其对应概率。

2.3 目标函数

本文选择以开关状态为优化对象, 以风电出力为随机变量, 以网络抗毁性最大和高于置信水平下的网络有功损耗最小为目标函数。

(1) 网络抗毁性为

$$f_1 = \max \text{Inv}(G) \quad (6)$$

式中, G 为配电网重构过程中某些分段开关和联络开关开断、闭合情况下对应的辐射网络。对应抗毁性计算如第 1 节内容所述。

(2) 高于置信水平 α 下有功损耗目标函数为

$$f_2 = \min \bar{f} \quad (7)$$

$$\sum_{\xi=1}^{\xi_{\max}} p\left(\sum_{i=1}^N r_i k_i |I_i|^2 \leq \bar{f}\right) \geq \alpha$$

式中: N 为网络支路总数; r_i 为支路 i 的阻抗; k_i 为开关 i 的状态, $k_i = 0$ 代表开关 i 断开, $k_i = 1$ 代表开关 i 闭合; ξ 、 ξ_{\max} 为风电出力随机变量数和随机变量数最大值。

2.4 约束条件

(1) 节点电压约束为

$$p(V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}) \geq \beta_1 \quad (8)$$

(2) 支路潮流约束为

$$p(S_i \leq S_i^{\max}) \geq \beta_2 \quad (9)$$

(3) 配电网辐射网络约束为

$$g \in G \quad (10)$$

(4) DG 出力约束为

$$P_{G_i}^{\min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i}^{\max} \quad (11)$$

式中: V_i 为重构过程中节点 i 的电压, V_i^{\min} 、 V_i^{\max} 为节点 i 的电压上下限; S_i 、 S_i^{\max} 为重构过程中支路 i 上流过实际潮流和最大允许流过潮流; g 为重构过

程中配电网网络结构; G 为辐射状网络拓扑结构; P_{G_i} 、 $P_{G_i}^{\max}$ 、 $P_{G_i}^{\min}$ 为分布式电源 DG_i 的实际出力和出力上下限。

3 基于改进蚁群算法求解含风电的配网多目标重构

结合配电网重构这一具体问题, 蚁群算法有以下弊端: 寻优时间较长, 主要在于构造的解中有很多是不满足辐射状要求的不可行解; 容易陷入局部最优解, 导致寻优过程停滞。

针对蚁群算法的这些问题, 本文对蚁群算法进行以下改进。

(1) 生成树策略

将蚁群算法与生成树策略相结合, 保证搜索过程中蚂蚁路径都满足辐射状要求, 避免产生不可行解。如文献[11]中, 对每只蚂蚁定义三个集合: 已连入树中的节点集合 $Tabu$; 未连入树的节点集合 $Node$; 每只蚂蚁下一条路径可选支路集合 $Nzhl$ 。对于可选支路集合 $Nzhl$, 支路对应的两节点应分别属于集合 $Tabu$ 和 $Node$ 。每选择一条待选支路后, 对集合 $Tabu$ 和 $Node$ 进行相应的更新变化。

(2) 动态路径选择策略

蚁群算法中路径选择由路径选择概率来决定, 路径选择概率取决于路径信息素强度和路径启发函数。选择路径概率最大(信息素强度最大)的支路, 容易陷入局部最优; 采用轮盘赌选择方法, 虽然增大了概率较小(信息素强度小)的支路被选择的几率, 扩大了解的空间, 但是使得寻优过程具有盲目性。本文充分利用两种路径选择策略的优点, 采用动态路径选择策略。

$$p_{ij}(k) = \begin{cases} \max(\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)) & q \leq q_0 \\ \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in Tabu_k} \tau_{is}^\alpha(t)\eta_{is}^\beta(t)} & q > q_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻支路 ij 上的信息素值; $\eta_{ij}(t)$ 为支路 ij 阻抗的倒数, 表示 t 时刻选择支路 ij 的启发值; α 、 β 代表信息素值和启发值所占的权重; $q \in [0,1]$, 是一随机变量, 用来选择路径选择策略; q_0 为路径选择策略阈值, 为一动态数值, 与迭代次数有关。

(3) 多目标优化信息素更新策略

借鉴多目标决策理论中的偏好信息、级别优先等相关理论, 本文在多目标优化重构过程中, 蚁群算法信息素更新仍采取单目标优化时的更新方式,

仅从降低网络损耗的角度来更新网络路径的信息素。为避免陷入局部最优,提高全局寻优的能力,采用如式(13)信息素更新策略。

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (13)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \Delta\tau_{ij}^{\text{rbest}} = \begin{cases} Q/P_{\text{loss}_i} & \text{支路}ij \in s_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \Delta\tau_{ij}^{\text{gbest}} = \begin{cases} Q/P_{\text{loss}_g} & \text{支路}ij \in s_g \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: ρ 表示信息素挥发率; Q 为常数; P_{loss_i} 为第 i 次迭代搜索过程中的网损最优值; s_i 为第 i 次迭代搜索过程中网损最优对应的最优路径; P_{loss_g} 为每进行 5 次迭代搜索过程中全局网损最优值; s_g 为每进行 5 次迭代搜索过程中全局网损最优对应的最优路径。

每次迭代后,按照式(13)、式(14)进行信息素的更新;每进行 5 次迭代后,按照式(13)、式(15)进行信息素的更新。

(4) 算法步骤

基于改进蚁群算法的含风电配电网多目标重构求解步骤如下。

- 1) 输入配网数据、风机相关参数。
- 2) 根据风速区间及风速概率密度函数构建多个风电出力随机变量,以及对应概率。
- 3) 设置改进蚁群算法蚂蚁数量 m 、迭代次数 N_{max} 等参数,开始迭代 $N=1$ 。
- 4) 对第 i 蚂蚁(开始时 $i=1$),利用生产树策略和动态路径搜索策略,搜索对应的辐射状网络。
- 5) 对搜索到的辐射状网络,考虑到步骤 2)中构建的风电出力随机变量,基于机会约束规划,求解目标函数:网络抗毁性以及置信水平下的网络损耗。
- 6) 检验置信水平下的约束条件。如果置信水平下的约束条件不满足,则 $i=i+1$ 。如果 $i < m$,则跳到步骤 4),进行下一只蚂蚁的搜索。否则转入步骤 7)。
- 7) 对本次迭代进行 Pareto 寻优,形成 $RESULT1$ 矩阵。并进行信息素的更新。
- 8) 将 $RESULT1$ 中的非劣解与上一次迭代后 $RESULT0$ 中的非劣解合并,存入矩阵 $RESULT2$ 中,并对 $RESULT2$ 中的解进行 Pareto 寻优,存入矩阵 $RESULT0$ 。
- 9) 令 $N=N+1$ 。判断 N 是否达到最大迭代次数 N_{max} ,如果 $N < N_{\text{max}}$,转到步骤 4),否则转入步骤 10)。
- 10) 达到最大迭代次数,算法结束,得到最优

网络结构以及目标函数值。算法流程图如图 1 所示。

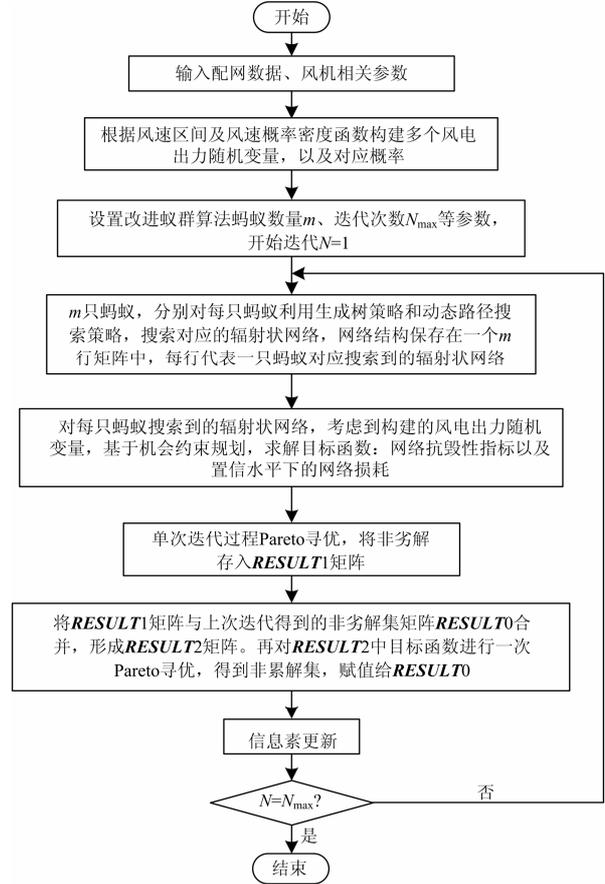


图 1 基于改进蚁群算法的含风电配电网多目标重构的流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators based on improved ACO

4 算例分析

4.1 33 节点系统

算例 1 选用 IEEE33 节点系统^[11]进行算例分析,如图 2 所示。2 台风力发电机组安装在节点 8、33 处,并假定两风力发电机组相同且具有相同的风速变化情况;风机的技术参数参考文献[4],额定功率为 400 kW,功率因数为 0.9,切入风速、额定风速、切出风速分别为: 3 m/s、14 m/s、25 m/s, c 、 k 分

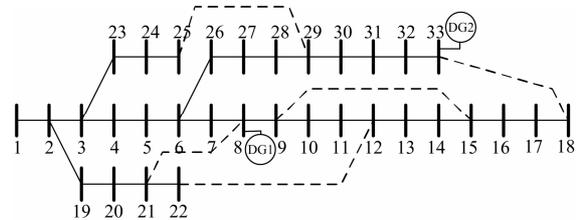


图 2 IEEE33 节点系统图

Fig. 2 IEEE33-node distribution system

别为 9.19、1.93。根据风速区间及风速概率密度, 计算风电出力随机变量及其对应的概率, 如表 1 所示。对算例 1, 考虑网络结构优化的配电网重构结果如表 2 所示。

表 1 风电出力随机变量及其对应概率

Table 1 Wind power output random variables and their corresponding probability

随机变量数	风速区间/(m/s)	概率	风电出力/kW	随机变量数	风速区间/(m/s)	概率	风电出力/kW
1	0-3	0.108	0	8	9-10	0.075	236.4
2	3-4	0.073	18.2	9	10-11	0.065	272.7
3	4-5	0.084	54.5	10	11-12	0.055	309.1
4	5-6	0.090	90.9	11	12-13	0.046	345.5
5	6-7	0.091	127.3	12	13-14	0.037	381.8
6	7-8	0.088	163.6	13	14-25	0.104	400
7	8-9	0.083	200	14	25-	0.001	0

表 2 算例 1 考虑网络结构优化的含风电配电网重构结果

Table 2 Reconfiguration results of case 1

方案详细情况	网损/kW	网络抗毁性	断开支路
初始网络 不含 DG	202.68	0.062 691 850 521 001 3	33,34,35,36,37
初始网络 含 DG	183.33	0.062 691 850 521 001 3	
本文算法 1	124.71	0.062 816 341 641 320 6	7, 9,14,28,32
本文算法 2	129.55	0.062 936 754 433 219 2	7,10,14,27,36
本文算法 3	131.81	0.062 936 822 235 426 7	7,10,14,26,32
本文算法 4	132.63	0.062 997 976 686 058 5	7,10,13,27,32

4.2 69 节点系统

算例 2 选用美国 PG&E69 节点配电系统^[12]进行算例分析, 如图 3 所示。2 台风力发电机组安装在节点 39、50 处, 风力发电机组型号与算例 1 中风力发电机组型号相同, 故计算风电出力随机变量及其对应的概率, 亦如表 1 所示。此时, 算例 1 的配电网重构结果如表 3 所示。

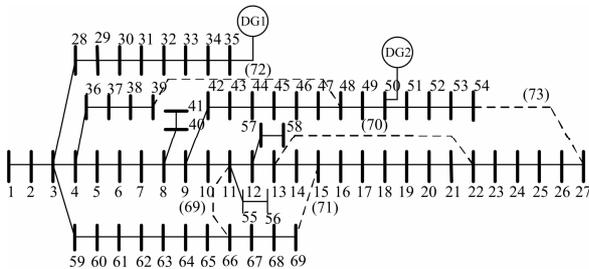


图 3 PG&E69 节点系统图

Fig. 3 PG&E69-node distribution system

表 3 算例 2 考虑网络结构优化的含风电配电网重构结果

Table 3 Reconfiguration results of case 2

方案详细情况	网损/kW	网络抗毁性	断开支路
初始网络 不含 DG	226.07	0.029 463 946 617 585 9	69,70,71,72,73
初始网络 含 DG	206.32	0.029 463 946 617 585 9	
本文算法 1	92.45	0.029 470 215 109 275 7	12,20,46,52,69
本文算法 2	96.92	0.029 483 139 273 133 5	13,18,46,52,69
本文算法 3	98.58	0.029 489 499 639 874 9	9,12,18,46,50
本文算法 4	109.33	0.029 502 722 122 223 5	6,13,18,46,52

由表 2、表 3 结果可知, 1) 初始网络中接入 DG(风电), 并考虑到风电出力的随机性, 系统有功网损均减少了约 10%, 同时由于接入风电, 网络拓扑结构没有发生变化, 所以网络抗毁性相同; 2) 重构后, 得到了 4 个较优可行解, 重构后的网络有功损耗、网络抗毁性均得以优化。相对于接入风电的初始网络, 方案 1 对应的重构后网络, 有功损耗最小, 分别减小了 32%、55%, 网络抗毁性较差。方案 4 的网络抗毁性最好, 网络损耗较差, 分别减小了 27.7%、47%。方案 2、3, 有功损耗和网络抗毁性指标相差较小, 且均较满意, 决策者在选择时可以根据断开支路操作的方便程度来选择方案 2 或方案 3。

5 结论

1) 从连通性角度, 引入网络抗毁性指标, 作为配电网重构的一个新的目标函数, 用以优化配电网网络结构。

2) 考虑到风电出力的随机性, 根据风速区间和风速概率密度函数, 构建风电出力随机变量及其对应概率, 并建立了基于机会约束规划的配电网重构模型。

3) 结合生成树策略、动态路径选择策略和多目标信息素更新策略, 对基本蚁群算法进行改进, 求解所建配电网重构模型。

下一步研究是将网络抗毁性指标应用于配电网故障恢复中的孤岛划分中。

参考文献

[1] RUBIN T, DRAGOSLAV R. Distribution network reconfiguration for energy loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 398-406.
 [2] 李樊, 刘天琪, 江东林. 采用改进免疫算法的多目标

配电网重构[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 134-138.

LI Fan, LIU Tianqi, JIANG Donglin. Distribution network reconfiguration with multi-objective based on improved immune algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 134-138.

[3] 卫健, 吕林, 魏震波, 等. 计及可靠性因素的配电网多目标重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 71-75.

WEI Jian, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Multi-objective reconstruction algorithm of distribution network considering the reliability factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 71-75.

[4] 何禹清, 彭建春, 文明, 等. 含风电的配电网重构场景模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 12-18.

HE Yuqing, PENG Jianchun, WEN Ming, et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 12-18.

[5] 王威, 韩学山, 李保银. 基于机会约束规划的含风机配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(5): 23-26.

WANG Wei, HAN Xueshan, LI Baoyin. Reconfiguration of distribution network with wind turbines based on chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 23-26.

[6] 邹必昌, 龚庆武, 李勋. 基于负荷平衡的配电网重构遗传算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 80-83, 111.

ZOU Bichang, GONG Qingwu, LI Xun. Research on network reconfiguration GA in distribution system based on load balancing[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 80-83, 111.

[7] 陈春, 汪飒, 黎灿兵, 等. 含分布式风电的配电网预防性重构[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 172-177.

CHEN Chun, WANG Feng, LI Canbing, et al. Preventive reconfiguration of distribution networks with distributed wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 172-177.

[8] 李秀卿, 李文, 杨云鹏. 含有风力发电机组配电网多目标重构的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 63-67.

LI Xiuqing, LI Wen, YANG Yunpeng. Distribution network multi-objective reconfiguration with wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 63-67.

[9] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析的中压配电网拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.

YANG Lixi, ZENG Xinmei, FANG Qianghua, et al. Medium voltage distribution network topology based on survivability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 65-69.

[10] 吴霜, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑网络抗毁性的配电网网架多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 137-142.

WU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Multi-objective planning of distribution network considering network survivability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 137-142.

[11] 杨丽君, 卢志刚, 文莹. 含异步风电机组的配电网故障恢复研究[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 133-137.

YANG Lijun, LU Zhigang, WEN Ying. Fault recovery of distribution network containing asynchronous wind power generation units[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 133-137.

[12] 王少林, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑分布式电源出力调整的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 117-122.

WANG Shaolin, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective optimization of distribution network reconfiguration considering adjusting the output of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 117-122.

收稿日期: 2014-11-17; 修回日期: 2014-12-30

作者简介:

李 奔(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行优化及控制; E-mail: 552430761@qq.com

刘会家(1969-), 男, 通信作者, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为配电网自动化、绝缘设备故障诊断; E-mail: eqallhj@ctgu.cn

李 珺(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定性。

(编辑 周金梅)