

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181541

计及分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型

王波¹, 虞殷树¹, 贺旭¹, 王晴¹, 周念成², 吴佳芳²

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315000;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要: 提出一种计及分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型。首先, 对分布式电源并网后改善区域型负荷平衡和确保上级电源事故备用不超限问题进行了分析, 将分布式电源的返送电流和上级电源备用容量统称为分布式电源并网安全约束。在此基础上, 提出了区域电源总变电容量和 10 kV 馈线网络结构这两项配电网改接方案评价指标。随后建立了计及分布式电源并网安全约束的 10 kV 配电网改接优化模型, 并且对 10 kV 馈线网结构指标不合格、区域电源总变电容量指标合格的配电网, 采用免疫遗传算法对所建模型进行求解。最后, 通过对某片区实际 10 kV 配电网改接优化问题的仿真分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 分布式电源; 配电网络改接; 并网安全约束; 免疫遗传算法

An optimization model for restructuring distribution network considering grid-connected security constraints of DGs

WANG Bo¹, YU Yinshu¹, HE Xu¹, WANG Qing¹, ZHOU Niancheng², WU Jiafang²

(1. Ningbo Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper proposes an optimization model for restructuring distribution network in consideration of grid-connected security constraints of DGs. First, the problems of improving regional load balance and ensuring emergency reserve of the upper-level power supply not exceeded after distributed generation connection are analyzed, and the distributed generations' return current and the upper-level power reserve capacity are collectively called distributed generation grid-connected safety constraints. And then, two evaluation indexes of regional power total substation capacity and 10 kV feeders' network structure are proposed. Subsequently, this paper proposes an optimization model for restructuring 10 kV distribution network in considering grid-connected security constraints of DGs. Immune genetic algorithm is used to solve the model that regional power total substation capacity is qualified but 10 kV feeders' network structure is not. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation analysis of a practical 10 kV distribution network's restructuring and optimization problem.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

Key words: distributed power sources; restructuring distribution network; grid-connected security constraints; immune genetic algorithm

0 引言

随着风电、光伏等分布式电源的大量接入, 城市配电网逐渐朝着高密度和多样化的方向提速发展。分布式电源在城市配电网中的渗透率不断扩大,

导致部分问题逐渐突显: 1) 区域型负荷不平衡发展; 2) 高密度分布式电源并网后事故备用问题。关于区域型负荷不平衡发展, 即在负荷中心的某些局部地区未接入分布式电源, 而工商业负荷增长较快, 出现 110 kV 主变超载、10 kV 馈线满载或超载情况; 在另外某些地区, 高密度分布式电源并网运行, 大量并网功率就近消纳。因此不同地区的 10 kV 馈线

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577018)

潮流将出现极不平衡的状态。对于高密度分布式电源并网后的事故备用问题, 即当分布式电源发生故障时, 上级电源需对分布式电源提供事故备用。比如, 在 10 kV 馈线分布式电源短路故障时, 其支路开关保护和机组差动保护跳闸, 分布式电源脱网运行, 此时上级电源要向该条线路提供更多的功率。

为保证配电网负荷尽可能区域平衡且配电设备安全稳定运行, 需尽可能减少高密度分布式电源并网产生的事故备用, 降低主变利用率^[1]。因此在现有配电网基础上有必要采用快速、合理、高效的线路迁改方案以及变电站新建工程规划, 改善配电网网架结构, 使分布式电源能就近消纳, 区域型负荷分散平衡, 从而减轻 110 kV 站或 35 kV 站的下网功率; 并且在分布式电源发生故障时, 上级电源提供的事故备用不超过其自身能力。为此本文以即将并网的分布式电源为评估对象, 对并网后引起的配电网负荷不平衡发展以及事故备用问题进行约束, 并将其统称为分布式电源并网安全约束。

考虑分布式电源并网安全约束对 10 kV 配电网改接方案的影响, 本文建立了计及分布式电源并网安全约束的配电网重构与配电网架拓展规划相互协调的优化模型。为了更加切合实际生产, 本文将其定义为“改接优化”模型, 即考虑网络重构的配电网拓展规划模型。通过“改接优化”, 充分利用分布式电源的接入、配电网联络开关和变电站站内开关的组合优化以及配电线路的最优迁改或者新投方案, 解决区域负荷不平衡问题, 并最大化减少其配电网投资改造的费用。

目前, 以配电网重构的方式解决 10 kV 线路超载问题的研究, 主要是从配电网转供优化的角度展开的研究。文献[2]采用变步长重复潮流算法, 分别对整个配电网、单个区域、单个负荷点进行供电能力评估, 得到不同线路的最大转供能力。文献[3]以多次协同转供的方式, 进行配电网最大供电能力评估, 得到配电网的最大转供能力。文献[4]提出了考虑主变上层油温约束的高压配电网转供优化模型, 以最小的开关操作成本, 解决高压配电网中的超载问题。

针对配电网网架扩展规划的现有研究, 主要是对新建设备进行网架结构规划、变电站规划、变电站-网架结构联合规划, 以此来解决电网运行安全问题, 例如文献[5-6]提出新建线路扩大输电容量, 以解决线路的输电断面超限问题; 文献[7]采用云理论对变电站新投选址定容问题进行研究, 解决地区负荷增长问题; 文献[8]将变电站和网架结构同时进行优化, 从全局优选出最佳的变电站选址和线路扩容方案。

由此可见, 关于配电网重构与扩展规划现有研究还没有有效地进行协调考虑^[9]。如果尽可能充分利用电网运行方式以及现有配电网网架的短期规划为手段, 就可以以最小的投资来进行架空线路和电缆线路的解头、搭头等线路迁改工程^[10-11], 就能解决区域负荷不平衡问题。

在现有配电网中, 分布式电源并网个数不断增加, 如果将配电网重构、扩展规划与分布式电源并网结合, 将有利于从“网-源”协调的角度解决区域负荷不平衡问题。在分布式电源并网的相关研究中, 主要研究内容可分为两类: 1) 在不影响配电网安全运行的前提下, 确定分布式电源的最大接入容量, 文献[12-14]分别考虑了电压安全约束、谐波约束以及短路容量约束; 2) 考虑配电网负荷分布特性, 如何确定分布式电源的最佳接入位置和最大准入容量, 文献[15-16]提出了准入容量与优化布置的方法, 文献[17]提出了一种光伏准入容量的计算方法。以上两类研究均从分布式电源规划角度确定其并网位置和容量大小, 并保证对配电网的安全运行不造成较大影响。但在准入容量确定的情况下, 分布式电源并网后, 如何充分利用其电源特性改善区域负荷平衡^[18], 不引起上级电源事故备用超限, 并减少对继电保护^[19]的影响还未见文献研究。

因此本文尝试对分布式电源的并网安全约束进行建模, 建立分布式电源的返送电流约束和上级电源备用容量约束, 在此基础上提出区域电源总变电容量合格和 10 kV 馈线网络结构合格两项指标, 建立计及分布式电源并网安全约束的 10 kV 配电网改接优化模型。考虑到所建配电网改接模型非连续, 提出采用免疫遗传算法(Immune Genetic Algorithm, IGA)^[20]对模型进行求解。最终得到配电网改接规划的最佳方案, 以及对应的最小改接工程费用。

1 分布式电源的并网安全约束

1.1 分布式电源的返送电流约束

在实际配电网中, 110 kV 或者 35 kV 变电站站内的 10 kV 线路配置的保护主要有: 过流 I、II、III 段电流速断保护、过负荷保护、零序 I、II、III 段电流速断保护。对于 10 kV 馈线上的支路首端开关一般配置有过流保护, 具体见表 1。

由于实际 10 kV 线路都允许短时过负荷, 比如 400/5 的 CT, 10 kV 线路所带负荷电流可以高达 500 A。故按 CT 额定值整定的过负荷保护, 一般也触发告警信号, 对应保护不会让其出口。但 10 kV 保护不带方向, 当多个分布式电源并网后, 若其并网出力总和较大, 则会通过 10 kV 馈线对上一级电

表 1 配电网线路配置的主要保护

保护类型	整定原则	时限	投/退
10 kV 馈线首端	过流 I 段	三相短路故障电流大小整定	0.0 s 投入跳闸
	过流 II 段	最大负荷电流大小整定	0.6 s 投入跳闸
	过流 III 段	最大负荷电流大小整定	0.6 s 退出
	过负荷	CT 二次额定值	6.0 s 退出
	零序 I、II、III 段	两相短路接地故障零序电流	- 退出
10 kV 支路首端	过流保护	三相短路故障电流大小整定	0.0 s 投入跳闸

网反送功率, 可能引起过负荷报警; 如果返送电流更大, 可能会在 0.6 s 后引起过流 II 段动作。

另外, 由于配电网线路大多数都仅采集两相电压, 以节约投资, 故其零序 I、II、III 段保护不准确, 一般为退出状态。考虑到过流 I 段按三相短路故障整定, 其整定值一般是过流 II 段的整定值 10 倍左右。若 10 kV 返送电流小于过流 II 段的整定值, 则不会引起任何保护动作。

为此, 本文中的分布式电源的返送电流约束, 只需要其满足小于变电站站内 10 kV 速断过流 II 段整定值以及各个支路开关的过流保护整定值即可。具体表示为

$$\sum_{j=1}^{n_G} I_j \leq I_s \quad (1)$$

$$\sum_{j \in \varphi} I_j \leq I_k \quad (2)$$

式中: I_j 表示某条 10 kV 线路中第 j 个分布式电源提供的最大电流; n_G 表示接入这条 10 kV 线路的分布式电源个数; I_s 表示这条 10 kV 线路的过流 II 段的整定值; φ 表示这条 10 kV 线路中的支路开关集合; I_k 表示这条 10 kV 线路中接入分布式电源的支路首端开关的动作电流整定值。

1.2 上级电源备用容量约束

分布式电源接入配电网后, 发生故障将脱网运行, 此时上级电源会增加出力, 以对其所供负荷提供功率。假设多个分布式电源同时发生故障的概率很小, 可忽略不计, 为保证上级电源增加出力的同时不出现超载现象, 以并网容量最大的分布式电源出力小于电源提供的备用容量作为上级电源备用容量的约束条件。则对于各 110 kV 站或 35 kV 站的主变, 其上级电源备用容量约束为

$$\max\{P_{ij}\} \leq \Delta P_s \quad i=1,2,\dots,n_L, \quad j=1,2,\dots,n_G \quad (3)$$

式中: P_{ij} 表示该条 10 kV 母线上第 i 条 10 kV 线路中第 j 个分布式电源提供的最大有功出力; n_L 表示 10 kV 线路的条数; ΔP_s 表示上级电源点的 10 kV 母线上所有 10 kV 线路的分布式电源事故备用容量值。

本文将分布式电源的返送电流约束和上级电源备用容量约束统称为分布式电源的并网安全约束。

2 含分布式电源的配电网改接方案评价指标

为保证分布式电源的接入不会对配电网的区域负荷平衡和安全运行造成影响, 则需确定在哪些地区进行 10 kV 线路迁改、新投 110 kV 变电站或 10 kV 线路, 应结合全配电网负荷大小、分布和分布式电源的出力、分布特性对现有配电网进行评估。在充分考虑分布式电源出力情况, 且该区域电源的总变电容量能够满足的前提条件下, 某区域配电网负荷仍然较重, 若能通过 10 kV 线路改接的方式将部分负荷转移, 则表示该 10 kV 馈线网络的结构不合理。若无法通过 10 kV 线路改接的方式解决负荷增长问题, 则只能考虑新投 110 kV 变电站或者 10 kV 线路, 则表示该区域配电网总变电容量不够。

针对以上两种情况, 本文提出相应的区域电源总变电容量合格和 10 kV 馈线网络结构合格两项指标, 对是否进行配电网改接提供依据。

2.1 区域电源总变电容量合格指标

区域电源总变电容量合格指标是指在该 10 kV 馈线线路容量满载或者超载后, 能够通过相关线路迁改的方式解决满载或者超载问题。若该指标不能满足, 则表示该区域仅能通过新建线路或者新投变电站的方式予以解决。区域内所有配变最大负荷小于对该区域供电的所有 110 kV 变电站可供容量和所有分布式电源最大出力之和, 即表示该指标合格, 具体表示为

$$g_k(x, y, z) \leq \sum_{\Gamma \in \Omega} S_{\Gamma} + \sum_{i \in k} P_i \quad \forall k \quad (4)$$

式中: g_k 表示第 k 条 10 kV 馈线的总负荷; S_{Γ} 表示第 Γ 个 110 kV 主变容量; Ω 表示该区域内的 110 kV 主变集合; P_i 表示第 k 条 10 kV 馈线上分布式电源的最大有功出力; x, y, z 分别表示电缆、架空线路、联络开关的迁改变量。

2.2 10 kV 馈线网络结构合格指标

10 kV 馈线网络结构合格指标是指 10 kV 馈线不出现超载情况。若 10 kV 馈线上配变负荷重载甚至超载, 引起 10 kV 馈线线路容量满载或超载, 通过该馈线网络相关线路迁改的方式, 改变分布式电

源并网线路或者重载负荷的供电网络结构，解决 10 kV 馈线线路满载或者超载问题。具体表示为

$$\sum_{\Gamma \in \Omega} \sum_{k \in \Gamma} g_k(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \leq M_k \quad \forall k \quad (5)$$

式中： Ω 表示该区域内的 110 kV 主变集合； g_k 表示第 Γ 个 110 kV 主变所供的第 k 条 10 kV 馈线的总负荷； M_k 表示第 k 条 10 kV 馈线的容量。

3 计及分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型

3.1 配电网的迁改、新投方式建模

实际的配电网迁改，主要分为电缆线路迁改、架空线路迁改和新建联络开关。其中电缆为两端口元件，而架空线路为多端口元件，在线路改接上，两者有明显不同。电缆改接只能通过环网柜进行，不能采用电缆 T 接的方式；而架空线路迁改能采取 T 接方式连接多条分支线路。

对分布式电源而言，需要新投线路才能将分布式电源并网，一般而言分布式电源以风电、光伏、燃气机组为主，其新投产线路多数为电缆线路。

下面对实际配电网的迁改、新投方式分别进行介绍。

3.1.1 10 kV 电缆线路的迁改方式

10 kV 电缆线路的迁改方式为对相邻不同电源的 10 kV 环网柜或者电缆分支箱进行电缆剪断解头和新建电缆牵线搭头工作，实现 10 kV 电缆线路迁改。具体方式如图 1 所示。

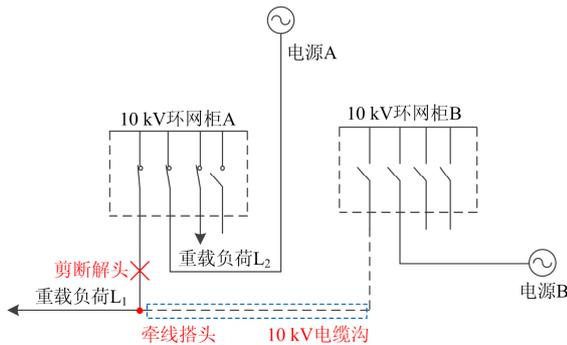


图 1 10 kV 电缆线路改接示意图

Fig. 1 Schematic diagram of connection modification of 10 kV cable line

图 1 中环网柜 A 和 B 距离位置较近，且有电缆沟直接连接这两个环网柜。实际中环网柜 A 由电源 A 供电，且带有重载负荷 L_1 和 L_2 ；环网柜 B 由电源 B 供电，且没有带负荷。现由于环网柜 A 负荷较重，将重载负荷 L_1 电缆剪断，然后通过环网柜 A 和环网柜 B 的地下电缆沟新建电缆，并与重载负荷

L_1 电缆的剪断点进行搭头。这样可将载负荷 L_1 迁改入环网柜 B，减轻电源 A 的供电压力。

采用数学模型对此改接方式进行描述，令电缆线路 i 对应环网柜接入间隔 j 的迁改变量为 x_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N_{\text{cable}}, j = 1, 2, \dots, N_{\text{cabinet}}$)，即

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad (6)$$

式中， $x_{ij} = 1$ 表示电缆线路 i 应接入环网柜内第 j 条可接入间隔。如果电缆线路 i 原本就接入的是第 j 条间隔，则表示该条电缆线路 i 没有改接。相反， $x_{ij} = 0$ 表示电缆线路 i 不接入环网柜内第 j 条可接入间隔。

3.1.2 10 kV 架空线路的迁改方式

10 kV 架空线路的迁改方式为对不同电源的相邻架空线路进行接头和搭头，完成线路迁改工程。具体方式如图 2 所示。

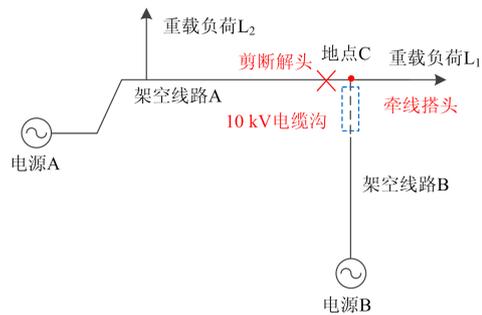


图 2 10 kV 架空线路改接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of connection modification of 10 kV overhead line

在图 2 中，10 kV 架空线路 A 和 B 在地点 C 相距较近。那么，现由于架空线路 A 负荷较重，将重载负荷 L_1 在地点 C 处将架空线路剪断，然后通过地点 C 处的地下电缆沟新建电缆，再进行架空线路 T 接，也可以直接架设架空线路 T 接，直接将重载负荷 L_1 迁改入架空线路 B，减轻电源 A 的供电压力。

采用数学模型对此迁改方式进行描述，令架空线路 i 在可改接地点处接入架空线路 j 的迁改变量为 y_{ij} ($i = 1, 2, \dots, N_{\text{line}}, j \in \Phi_i$)，即

$$y_{ij} = \{0, 1\} \quad (7)$$

式中： Φ_i 表示架空线路 i 对应可迁改至其他架空线路的集合； $y_{ij} = 1$ 表示架空线路 i 迁改入架空线路 j ，相反， $y_{ij} = 0$ 表示架空线路 i 不接入架空线路 j 。

3.1.3 10 kV 联络开关的迁改方式

相邻架空线路、相邻的架空线路和电缆环网柜的末端迁改采取的方式是新建架空线路连接相邻两

条线路末端, 并在连接处串联一个联络开关。具体方式如图3所示。

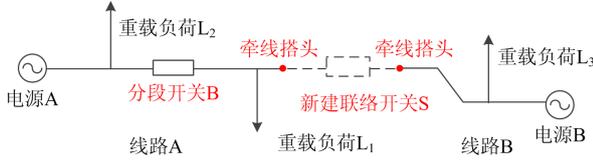


图3 10 kV 线路末端联络开关改接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of connection switch switching at end of 10 kV line

由图3可见, 10 kV 架空线路 A 和 B 的末端相距较近。由于架空线路 A 所带重载负荷 L_1 增大, 则可新建联络开关 S, 并断开架空线路 A 上支路开关 B, 将重载负荷 L_1 倒至电源 B 供电, 减轻电源 A 的供电压力。当电源 B 所带重载负荷 L_3 增大时, 而此时电源 A 能够带重载负荷 L_1 和 L_2 , 则可将支路开关 B 合上, 拉开联络开关 S, 将重载负荷 L_1 倒至电源 A 供电, 以减少电源 B 的供电压力。

由此可见, 这种迁改方式与前述两种有所不同, 这种迁改不仅能将负荷转供, 消除电源过载问题, 还能利用不同台区负荷早晚高峰的时间差异, 灵活调整配电网运行方式, 从而缓解总变电容量不合格指标区域中变电容量不足的问题。

采用数学模型对此迁改方式进行描述, 令架空线路 i 在末端处通过新建联络开关 S 连接架空线路或者环网柜 j 的迁改变量为 z_{ij} ($i=1,2,\dots,N_{line}, j \in \Phi_i$), 即

$$z_{ij} = \{0,1\} \quad (8)$$

式中: Φ_i 表示架空线路 i 末端通过新建联络开关 S 可改接至其他架空线路或者环网柜的集合; $z_{ij} = 1$ 表示线路 i 通过新建联络开关 S 连接架空线路或者环网柜 j , 相反, $z_{ij} = 0$ 表示架空线路 i 与架空线路或者环网柜 j 末端不通过联络开关连接。

3.1.4 分布式电源的线路新投方式

对分布式电源新投并网线路而言, 可能存在多条并网的接线方案, 具体方式如图4所示。

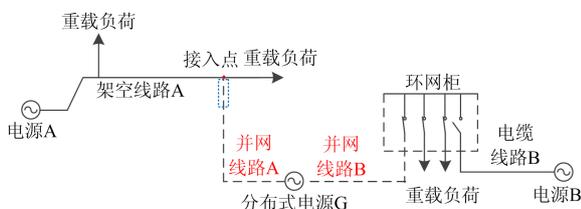


图4 分布式电源新投并网线路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of connecting lines by DGs

图4中分布式电源 G 的并网线路有 2 条, 分别是并网线路 A 和 B。其对应的上级电源线路分别为 10 kV 架空线路 A 和电缆线路 B。在实际工程中, 分布式电源 G 只能有 1 条并网线路, 故其可根据负荷平衡的需要和并网线路新投工程费用选择最佳的并网线路。

采用数学模型对此改接方式进行描述, 令分布式电源 i 选择新投并网线路 j 的改接变量为 u_{ij} ($i=1,2,\dots,N_G, j \in \Phi_i$), 即

$$u_{ij} = \{0,1\} \quad (9)$$

式中: N_G 表示分布式电源个数的集合; Φ 表示分布式电源的并网线路方案集合; $u_{ij} = 1$ 表示分布式电源 i 选择新投并网线路 j , 相反, $u_{ij} = 0$ 表示分布式电源 i 不选择新投并网线路。

3.2 配电网改接优化模型

根据以上 4 种配电网迁改、新投方案以及配电网运行开关变量的组合优化, 实现从运行优化和规划优化的双重角度解决区域配电网的负荷不平衡问题。为此, 本文提出建立计及分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型。

通过配电网的迁改、新投的方式以及配电网运行开关变量的组合优化, 对 10 kV 馈线网络结构指标不合格的区域, 以上述 x_{ij} 、 y_j 、 z_{ij} 和 u_{ij} 为 0-1 优化变量, 以及配电网运行的 0-1 开关变量 S (其中 1 表示开关运行, 0 表示开关断开) 来联合进行配电网的优化改接工程, 以从运行和规划方式共同解决负荷不平衡问题。

在改接工程投资费用方面, 假设涉及电缆或架空线路解头、搭头等改接费用为 F_1 , 单位长度线路改接施工费和配套工程所需单位长度材料费之和为 F_2 。故改接优化模型的投资总费用最小, 可列写目标函数为

$$\min F = F_1 + F_2 \quad (10)$$

电缆或者架空线路的解头搭头、新建联络开关等线路改接费用 F_1 等于

$$F_1 = w_1 \sum_{j=1}^{N_{cabinet}} \sum_{i=1}^{N_{cable}} (x_{ij} - x_{ij}^*) \Big|_{x_{ij} > x_{ij}^*} + w_2 \sum_{j \in \Phi} y_j + w_3 \sum_{j \in \Phi} z_j \quad (11)$$

式中: x_{ij}^* 表示电缆线路 i 在环网柜间隔 j 的原有的 0-1 状态; $x_{ij} > x_{ij}^*$ 表示仅计及电缆线路 i 改接入新环网柜 j 的值; w_1 、 w_2 、 w_3 分别表示三种线路搭头和解头工程的费用系数。

线路改接和新投施工费用和配套工程所需材料

费用 F_2 为

$$F_2 = \mathbf{B}^T \mathbf{L}_1 \mathbf{f}_x + \mathbf{y}^T \mathbf{L}_2 \mathbf{f}_y + \mathbf{z}^T \mathbf{L}_3 \mathbf{f}_z + \mathbf{u}^T \mathbf{L}_4 \mathbf{f}_u \quad (12)$$

式中: $B_i = \sum_{i=1}^{N_{\text{cable}}} |x_{ij} - x_{ij}^*| / 2$, 即表示电缆线路 j 的改接次数, 若存在改接, 则 $B_j = 1$, 若不存在改接, 则 $B_j = 0$; \mathbf{f}_x 、 \mathbf{f}_y 、 \mathbf{f}_z 分别是单位长度的线路改接施工费和配套工程费之和的费用向量; \mathbf{f}_u 表示新投分布式电源并网线路施工费和配套工程费之和的费用向量; \mathbf{L}_1 、 \mathbf{L}_2 、 \mathbf{L}_3 、 \mathbf{L}_4 分别是电缆、架空线路、联络开关需扩建线路和分布式电源并网扩建线路的长度矩阵。

约束条件为每条 10 kV 馈线所带配变总负荷不能超过该条线路容量, 且同一个 110 kV 变电站所有 10 kV 馈线的总负荷不能超过 110 kV 变电站主变容量。具体约束表达如下。

1) 10 kV 馈线容量约束

$$\sum_{j=1, j \neq \text{ref}}^{N_b} \dot{U}_j(\mathbf{Y}_{\text{bus}}(x, y, z, u, S) \dot{U}_j)^* \leq M_k \quad (13)$$

式中: $\sum_{j=1, j \neq \text{ref}}^{N_b} \dot{U}_j(\mathbf{Y}_{\text{bus}}(x, y, z, u, S) \dot{U}_j)^*$ 表示 10 kV 馈线平衡节点的注入潮流, 10 kV 平衡节点以 ref 表示; \dot{U}_j 表示第 j 个节点的电压; N_b 表示 10 kV 馈线的节点个数; \mathbf{Y}_{bus} 表示 10 kV 馈线的节点导纳矩阵; M_k 表示第 k 条 10 kV 馈线的容量。

2) 110 kV 主变容量约束

$$\sum_{k \in \Gamma} \sum_{j \in k, j=1, j \neq \text{ref}}^{N_b} \dot{U}_j(\mathbf{Y}_{\text{bus}}(x, y, z, u, S) \dot{U}_j)^* \leq S_r \quad (14)$$

式中, S_r 表示第 Γ 个 110 kV 主变容量。

3) 10 kV 馈线辐射网络约束

由迁改变量和开关变量形成的 (x, y, z, S) , 进行配电网改接优化模型计算时, 需满足配电网辐射型运行条件, 不能形成环网, 故

$$D(x, y, z, S) \leq 0 \quad (15)$$

式中, $D(x, y, z, S)$ 在免疫遗传算法的每一个个体中采用环网编码的方式进行判断, 具体见文献[16-18]的网络辐射形判断。

4) 10 kV 馈线连通性约束

由迁改变量和开关变量形成的 (x, y, z, S) , 进行配电网改接优化模型计算时, 配电网必须连接所有配变, 即不能形成孤岛网络, 即

$$h(x, y, z, S) \leq 0 \quad (16)$$

式中, $h(x, y, z, S)$ 在免疫遗传算法的每一个个体形成连同矩阵, 采用寻找父节点的方式对是否形成孤岛进行判断, 具体见文献[21-23]的连通性的判断。

5) 分布式电源的并网安全约束

根据第 1 节的分布式电源的并网安全约束可知, 包含正常运行下的返送电流约束和上级电源备用容量约束, 即式(1)一式(3)。

综上所述, 考虑分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型列写为

$$\begin{aligned} \min \quad & F = F_1 + F_2 + F_3 \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq \text{ref}}^{N_b} \dot{U}_j(\mathbf{Y}_{\text{bus}}(x, y, z, u, S) \dot{U}_j)^* \leq M_k \\ \sum_{k \in \Gamma} \sum_{j \in k, j=1, j \neq \text{ref}}^{N_b} \dot{U}_j(\mathbf{Y}_{\text{bus}}(x, y, z, u, S) \dot{U}_j)^* \leq S_r \\ D(x, y, z, S) \leq 0 \\ h(x, y, z, S) \leq 0 \\ \sum_{j=1}^{n_G} I_j \leq I_S \\ \sum_{j \in \phi} I_j \leq I_k \\ \max \{P_{ij}\} \leq \Delta P_S \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

3.3 求解流程

基于免疫遗传算法的整个模型求解流程如下:

1) 对于某区域内每条 10 kV 馈线, 统计其所带负荷是否超过馈线容量。若超过馈线容量, 即不满足式(5), 表明该条线路需要进行改接优化; 反之则不需要进行改接优化。

2) 对于第 1) 步中出现的 10 kV 馈线 i 超载情况, 采用区域电源总变电容量合格指标计算式(4)不满足, 对该区域进行判断, 如果区域变电容量足够, 则表明馈线 i 的网络结构指标不合格, 转步骤 3); 否则馈线 i 的网络结构指标和区域电源总变电容量指标均不合格, 转步骤 4)。

3) 若馈线 i 的网络结构指标不合格, 区域电源总变电容量指标合格, 则采用免疫遗传算法对馈线 i 涉及的配电网改接的改接优化模型, 求解出最佳的线路改接方案。

4) 若馈线 i 的网络结构指标和区域电源总变电容量指标均不合格, 则采取中长期的线路、变电站扩展规划方案进行解决。

5) 获得考虑分布式电源并网安全约束的配电网改接优化的最佳方案以及对应的最小改接工程费用。

4 算例分析

4.1 算例结果及分析

本文利用 Matlab R2012a 平台研究某片区配电网改接优化。在充分考虑分布式电源并网安全约束的基础上, 对该区域配电网进行相关线路迁改工程, 以保证该地区配电网在密度分布式电源接入后不会出现 110 kV 主变超载、10 kV 线路过载等问题。

该片区配电网接线如图 5 所示。在图 5 中, 共有 4 个 110 kV 电源, 分别是 110 kV HY 站、110 kV QL 站、110 kV LH 站和 110 kV ZH 站。在该片区中, 110 kV HY 站共有 5 条 10 kV 线路供电, 分别命名为 H1—H5; 110 kV QL 站对该片区 10 kV 供电线路共有 2 条, 分别命名为 Q1—Q2; 110 kV LH 站仅有 1 条 10 kV 线路供电, 命名为 L1; 110 kV ZH 站仅有 1 条 10 kV 线路供电, 命名为 Z1。其中, 该片区各 110 kV 站主变可供容量、10 kV 线路容量以及 10 kV 线路的首端速断 II 段保护的一次定值见表 2。



图 5 某片区的配电网络图

Fig. 5 Distribution network diagram for a certain area

另外, 共有 4 处分布式电源 $G_1—G_4$ 即将获准接入配电网, 其接入的位置如图 5 所示, 其容量和其并网支路开关的过流一次定值见表 3 所示。在图 6 的片区配电网中, 黑色线路表示电缆线路, 均分别接入各个环网柜 A—I 中, 每个环网柜中的刀闸间隔数目均为 4 个, 各个环网柜的电缆改接距离数据见表 4; 线路 L2 至 L4 的距离数据见表 5; 线路 H5 全线和 H1 末端为架空线路, 架空线路相距较近地

表 2 110 kV 站主变可供容量和 10 kV 线路容量

Table 2 Main transformers' available capacity of 110 kV substations and 10 kV line capacity

110 kV 变电站	主变可供容量/MVA	事故备用容量/MVA	10 kV 线路	10 kV 线路容量/MVA	速断保护 II 段定值/A
HY 站	40	10	H1	7	800
			H2	10	1 200
			H3	10	1 200
			H4	10	1 200
			H5	7	800
QL 站	20	5	Q1	10	1 200
			Q2	10	1 200
LH 站	10	2.5	L1	10	1 200
ZH 站	10	2.5	Z1	10	1 200

表 3 某片区配电网内的获准接入的分布式电源参数

Table 3 Maximum load data of the distribution network

分布式电源	装机容量/MVA	最大电流/A	支路开关的过流定值/A
G1	2.5	144	200
G2	5	288	300
G3	2.5	144	200
G4	2.5	144	200

表 4 各个环网柜的电缆改接距离数据

Table 4 Modified distance data of cables of cabinet

环网柜	km								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
环网柜 A	0	1.0	1.4	1.9	1.8	2.1	2.6	1.1	1.3
环网柜 B	1.0	0	0.8	1.0	0.6	1.2	1.8	0.9	1.3
环网柜 C	1.4	0.8	0	0.5	0.4	0.9	1.4	1.2	1.3
环网柜 D	1.9	1.0	0.5	0	0.2	0.8	1.1	0.9	1.3
环网柜 E	1.8	0.6	0.4	0.2	0	0.4	0.9	0.7	1.3
环网柜 F	2.1	1.2	0.9	0.8	0.4	0	0.5	0.5	1.3
环网柜 G	2.6	1.8	1.4	1.1	0.9	0.5	0	1.1	1.3
环网柜 H	1.1	0.9	1.2	0.9	0.7	0.5	1.1	0	1.3
环网柜 I	1.3	2.2	1.8	1.7	1.5	1.2	1.4	0.8	0

表 5 L2 至 L4 距离数据

Table 5 Distance data of L2 to L4

地点	距离/km	
	地点	距离/km
L2	A	0.22
	B	0.34
L3	C	0.10
	D	0.10
L4	E	0.30
	F	0.26
	G	0.21
	H	0.15
	I	0.16

点 A—D 处均以虚线连接，表示可进行架空线路解头、搭头改接或者联络开关搭建工程，在其余没有标识的地方不具备新建联络开关的改接条件。

在此配电网改接工程中，其改接的费用系数 w_1 、 w_2 、 w_3 、 f_x 、 f_y 、 f_z 、 f_u 如表 6 所示。为简化问题，本文假设对地下电缆沟可扩展间隔以及分布等情况均不予考虑。

表 6 三种改接工程的费用系数

Table 6 Cost coefficient of three kinds of modification projects

万元				
改接费用类别	系数 w_1	系数 w_2	系数 w_3	
线路接头搭头 F_1	0.5	0.2	0.8	
配套费用类别	系数 f_x	系数 f_y	系数 f_z	系数 f_u
人工施工费 F_2	1.0	0.6	2.0	0.2

本算例的最大用电负荷数据来自于迎峰度夏期间的 2017 年 7 月 25 日全天配电网 SCADA 采集值，表 7 给出了该片区内所有 10 kV 线路的最大用电负荷。

表 7 某片区配电网的线路最大负荷数据

Table 7 Maximum load data of the distribution network

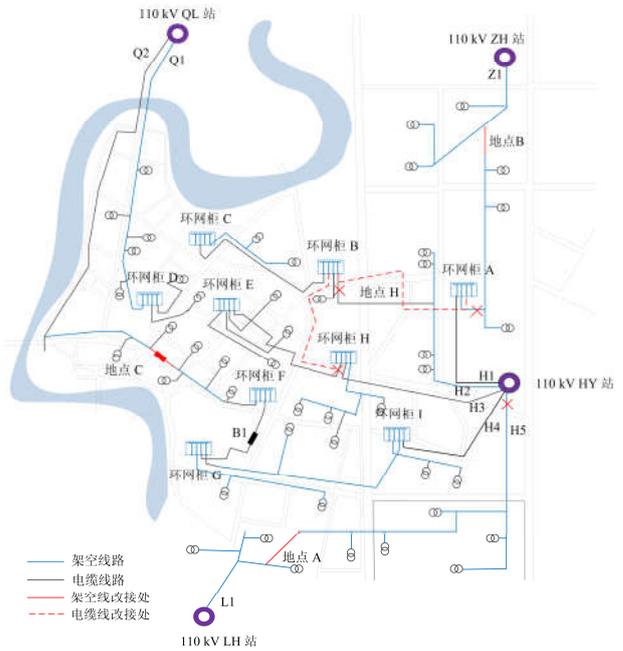
10 kV 馈线	SCADA 最大用电负荷/MW	正常最大负载率/%
H1	5.4	54.2
H2	11.9	119.0
H3	11.0	110.0
H4	10.8	108.0
H5	6.0	60.0
Q1	7.0	70.0
Q2	4.32	54.0
L1	3.44	43.0
Z1	2.56	32.0

4.2 算例结果及分析

下面展开配电网改接优化的评估。首先根据表 7 得到该片区所有配变负荷大小为 67.6 MVA，由表 2 可得该片区 3 个 110 kV 站电源可供容量为 80 MVA，可知区域电源总变电容量指标合格，10 kV 馈线网络结构指标不合格。

接着采用免疫遗传算法对该片区配电网进行改接优化计算。本文采用的免疫遗传算法抗体总数设定为 40；变异概率为 0.15，选择概率为 0.5，免疫遗传进化最大代数为 100 代。

图 6(a)为不考虑分布式电源准入的配电网改接规划结果，图 6(b)给出了考虑 4 个即将接入的分布式电源的新投规划结果。在图 6 中，规划新投线路用红色虚线进行表示，截断的架空线路和电缆线路采用红色“×”表示。



(a) 不考虑 DG 的最佳规划结果



(b) 考虑 DG 的最佳规划结果

图 6 某片区配电网网络图最佳规划结果

Fig. 6 Optimal planning solution of distribution system for a certain area

在图 6(a)中，地点 C 处为 10 kV 架空线路 Q2 与 10 kV 架空线路 H4 相近处，可进行架空线路迁改和新建联络开关。考虑到实际电网中 110 kV QL 站所供负荷均为该片区中心地带，因此所带负荷较重，可考虑新建联络开关，利用高峰负荷时间差，实现 HY 站和 QL 站所带负荷的转供。

在地点 A、B、D 处, 实际运行的 ZH 站和 LH 站负荷均较轻, 结合表 4 可知, 考虑新建联络开关成本高于架空线路迁改, 故令地点 A、B、D 处选择架空线路改接方式。

在图 6(b)中, 由于重载 10 kV 线路 H2、H4 均有分布式电源并网, 根据表 3 可知分布式电源 G_4 和 G_2 的容量分别是 2.5 MVA 和 5 MVA, 则重载 10 kV 线路 H2、H4 分别所供最大负荷为 11.9 MW 和 10.8 MW, 分别超载 1.9 MW 和 0.8 MW, 而分布式电源接入后可降低超载负荷。因此, 分布式电源 G_4 和 G_2 分别接入 10 kV 线路 H2、H4 与实际相符。分布式电源 G_2 的并网线路方案选择了距离环网柜最近的线路, 即从地点 G 处接入环网柜 G 中。对于分布式电源 G_1 而言, 其准入的 10 kV 线路为 H5, 负载仅有 60%, 经 H5 并网后可降低其 110 kV HY 站的主变下网功率近 2.5 MW。分布式电源 G_3 的并网线路方案为 Q2, 由图 6(b)可知, Q2 改接了部分 H3 所供的环网柜 E 的负荷。为减少 Q2 的负荷, 选择分布式电源 G_3 从地点 D 处接入的并网方案。

经过计算, 表 8 给出了该片区考虑分布式电源接入前后配电网改接的最小投资总费用。

表 8 配电网改接的最小投资总费用对比

项目	改接费用 F1	施工配套工程 F2	总和/万元
不考虑 DG	2.5	4.29	6.96
考虑 DG	0.5	1.90	2.40

根据表 8 可知, 在考虑分布式电源后, 其总的改接费用比不接入分布式电源的费用低很多。这是由于引入分布式电源后, 10 kV 线路就近负荷平衡, 大大减少了不必要的 10 kV 线路改接费用。

表 9 和表 10 分别给出了该片区考虑分布式电源接入前后配电网改接的负荷平衡对比。在表中, 110 kV 主变负载率等于当前所供全部 10 kV 线路负载之和除以主变可供容量; 10 kV 线路负载率等于当前所供总负荷除以 10 kV 馈线容量。

根据图 6(a)和表 9 可知, 在地点 C 处新建联络开关, 并断开支路开关 B1, 转移了 4 个重载配变(约 2.0 MVA)至 QL 站供电, 使得 10 kV 线路 H4 从负载率 103%下降至 83%, 解决了线路 H4 的超载问题。

根据表 10, 在其基础上若再接入容量为 5.0 MVA 的分布式电源 G_2 , 则还可以供环网柜 E 的重载配变(约 2.3 MVA), 解决了线路 H4 和 H2 的超载问题。

对于地点 A、B 处, 优化方案选择了在地点 A、B 两处进行架空线路迁改, 将 HY 站 10 kV 线路 H5 和 H1 所带负荷分别迁改至 LH 站和 ZH 站供电, 总

表 9 不考虑分布式电源的配电网前后负载率对比

110 kV 变电站	规划前		规划后		
	负载率/%	负载率/%	10 kV 线路	负载率/%	
HY 站	112	79.2	H1	87.1	94.7
			H2	114.0	73.7
			H3	116.0	94.0
			H4	103.0	83.0
			H5	77.1	0.0
QL 站	87.5	97.5	Q1	97.0	97.0
			Q2	78.0	98.0
LH 站	21.0	75.0	L1	21.0	75.0
ZH 站	32.0	93.0	Z1	32.0	93.0

表 10 考虑分布式电源的配电网前后负载率对比

110 kV 变电站	规划前		规划后		
	负载率/%	负载率/%	10 kV 线路	负载率/%	
HY 站	112	75.6	H1	87.1	34.0
			H2	114.0	70.1
			H3	116.0	94.0
			H4	103.0	90.0
			H5	77.1	35.0
QL 站	87.5	97.5	Q1	97.0	97.0
			Q2	78.0	82.0
LH 站	21.0	75.0	L1	21.0	21.0
ZH 站	32.0	93.0	Z1	32.0	93.0

共约 8.3 MVA 的负荷。若考虑分布式电源 G_1 并网, 则不需要将 10 kV 线路 H5 进行迁改, 这是由于分布式电源 G_1 上的容量为 2.5 MVA, 可将 H5 线路所供负荷从 6.0 MW 减少至 3.5 MW。

若不考虑分布式电源接入配电网, 则通过上述 3 种转供方式使得 HY 站负载率从 112%下降至 79.2%, 从而 110 kV 主变容量约束条件得以满足。若考虑分布式电源接入配电网, 则 HY 站负载率从 112%下降至 75.6%。由此可见, 结合分布式电源的配电网改接方案比传统配电网改接方案节省不少费用, 还会相应地降低电源点的主变负载率。

综上所述, 1) 采用 DG 联合配电网改接优化, 所需费用更少, 例如算例中采用 DG 后可节省新建联络开关、架空线路改接、电缆线路迁改等费用。2) 考虑分布式电源接入, 能够显著优化配电网的区域负荷平衡, 相比传统配电网的改接方案能产生更多的经济效益。

5 结论

目前风电、光伏等分布式电源大量接入城市配

电网, 本文提出一种考虑分布式电源并网安全约束的配电网改接优化模型。该模型成功解决了高密度分布式电源接入城市配电网后的区域型负荷不平衡和上级电源事故备用问题。首先, 本文给出了分布式电源并网安全约束的基本概念, 以此为切入点提出了区域电源总变电容量合格和 10 kV 馈线网络结构合格两项评价指标。随后建立了考虑分布式电源并网安全约束的 10 kV 配电网改接优化模型。最后通过实际配电网改接优化模型的仿真计算, 成功求解得到配电网改接优化最佳方案以及对应的最小改接工程费用。该模型具有如下特点:

1) 本文提出的区域电源总变电容量和 10 kV 馈线网络结构指标, 从根本上为高密度分布式电源并网的配电网改接优化方案提供了科学理论决策。

2) 分布式电源大量接入城市配电网, 如何验证其对负荷区域平衡和配电网安全运行的影响, 本文模型提供了有效的解决思路。

3) 对经济发展大跨进、电网负荷增速较快、分布式电源大量接入的热门地区, 本文模型能够有效指导该地区提前进行快速、合理、高效的线路迁改和变电站新建工程规划, 确保在大负荷增长期、大量分布式电源并网期间, 尽可能不出现设备超载问题, 为热门地区提供全面优质的能源服务奠定基础。

参考文献

- [1] 李生权, 钱文姝. 智能变电站技术的现状与发展趋势研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 59-64.
LI Shengquan, QIAN Wenshu. Research on the current situation and development trend of smart substation technology[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 59-64.
- [2] 李振坤, 陈星莺, 刘皓明, 等. 配电网供电能力的实时评估分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 36-39, 62.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, LIU Haoming, et al. Online assessment of distribution network loading capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 36-39, 62.
- [3] 朱嘉麒, 董树锋, 徐成司, 等. 考虑多次转供的配电网最大供电能力评估方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2275-2281.
ZHU Jiaqi, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Evaluation model of total supply capability of distribution network considering multiple transfers[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2275-2281.
- [4] 王强钢, 李钰双, 雷超, 等. 计及主变上层油温约束的受端电网转供优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4747-4758.
WANG Qianggang, LI Yushuang, LEI Chao, et al. Power transfer optimization model of receiving-end power systems considering transformer top-oil temperature constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4747-4758.
- [5] GREGORY L, MAZAL-TOV S, ELMARKS D. Genetic algorithm for open-loop distribution system design[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 32(2): 81-87.
- [6] DIAZ-DORADO E, CIDRAS J, MIGUEZ E. Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 879-884.
- [7] 李燕青, 谢庆, 王岭, 等. 云理论在配电网变电站选址定容中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 672-677.
LI Yanqing, XIE Qing, WANG Ling, et al. Application of cloud theory to optimal planning of substation locating and sizing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 672-677.
- [8] HINDI K S, BRAMELLER A. Design of low-voltage distribution networks: a mathematical programming method[J]. IEE Proceedings, 1977, 124(1): 54-58.
- [9] 沈同, 王通通, 宋汉梁. 大规模风电经柔直并网时的系统稳态控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 109-114, 122.
SHEN Tong, WANG Tongtong, SONG Hanliang. Control strategy for large-scale wind power generation connected with grids by VSC-DC[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 109-114, 122.
- [10] 李海林. 高压输电线路迁改工程方案要点分析[J]. 企业技术开发, 2018, 37(5): 84-85.
LI Hailin. Analysis on the key points of the plan for relocation of high voltage transmission lines[J]. Technological Development of Enterprise, 2018, 37(5): 84-85.
- [11] 李春炜. 10 kV 电力线路迁改施工风险点及应对措施[J]. 铁道建筑技术, 2018(7): 118-120, 123.
LI Chunwei. Risk location and countermeasures for reconstruction of 10 kV power lines[J]. Railway Construction Technology, 2018(7): 118-120, 123.
- [12] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [13] 钟清, 高新华, 余南华, 等. 谐波约束下的主动配电网分布式电源准入容量与接入方式[J]. 电力系统自动化,

- 2014, 38(24): 108-113.
ZHONG Qing, GAO Xinhua, YU Nanhua, et al. Accommodating capacity and mode of distributed generation under harmonic constraints in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 108-113.
- [14] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280.
ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [15] 阎鼎, 包海龙, 程浩忠, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统自动化学报, 2015, 27(10): 16-20.
YAN Ding, BAO Hailong, CHENG Haozhong, et al. Optimal allocation of maximum distributed generation capacity in distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(10): 16-20.
- [16] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(3): 473-478.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Optimal Reconfiguration of the active distribution network based on improved niche multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 473-478.
- [17] 商立群, 郭伟. 一种矩阵化描述的分布式光伏准入容量计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 25-30.
SHANG Liqun, GUO Wei. A matrix description method for calculating the distribution photovoltaic penetration level of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 25-30.
- [18] 王鲍雅琼, 陈皓. 配含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [19] 张勇军, 林晓明, 张紫珩, 等. 基于耐受渗透比的 10 kV 配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 49-54.
ZHANG Yongjun, LIN Xiaoming, ZHANG Ziheng, et al. Distributed generation planning of 10 kV distribution network based on tolerant permeability ratio[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 49-54.
- [20] LIU F, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Hybrid immune genetic method for dynamic reactive power optimization[C] // International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006: 1-6.
- [21] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [22] 高元海, 王淳, 游宇堃. 满足辐射状约束的编码和遗传算子及其在配电网重构中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2016(1): 234-242.
GAO Yuanhai, WANG Chun, YOU Yukun. Coding and genetic operators of satisfying network radial constraint and application in distribution network reconfiguration[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016(1): 234-242.
- [23] 屠强, 郭志忠. 辐射型配电网重构的二次电流矩法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 57-61.
TU Qiang, GUO Zhizhong. The quadratic current moment method for radial distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 57-61.

收稿日期: 2018-12-10; 修回日期: 2019-02-28

作者简介:

王波(1985—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 247622018@qq.com

虞殷树(1987—), 男, 学士, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: 393577460@qq.com

贺旭(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: 810492523@qq.com

(编辑 周金梅)