

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191234

含分布式电源的主动配电网重构策略研究

潘本仁¹, 王和春², 张妍¹, 桂小智¹, 万勇¹

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 国网江西省电力有限公司检修分公司, 江西 南昌 330029)

摘要: 针对分布式电源在配电网中不断增加及其波动性和间歇性对电网稳定和安全产生的影响, 提出了一种含有分布式的主动配电网重构策略。以最小网损作为目标函数, 将改进的教与学优化算法应用于主动配电网供电路径的快速优化中。通过算例对含分布式电源的主动配电网进行分析, 以验证改进算法在配电网重构中的优越性。结果表明, 该方法收敛速度快、寻优时间短、运行稳定。所做研究作为我国配电网中接入分布式电源的优化方法提供了参考和借鉴。

关键词: 分布式电源; 网损最小; 主动配电网; 重构策略

Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply

PAN Benren¹, WANG Hechun², ZHANG Yan¹, GUI Xiaozhi¹, WAN Yong¹

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. State Grid Jiangxi Power Company Maintenance Branch, Nanchang 330029, China)

Abstract: Given the increase of distributed power supply in the power distribution network, and considering the influence of its volatility and intermittent nature on grid stability and safety, this paper puts forward a reconfiguration strategy for an active distribution network with a distributed power supply. Taking the minimum network loss as the objective function, an improved teaching and learning optimization algorithm is applied for fast optimization of power supply paths in active distributed networks. The active distribution network with distributed power supply is analyzed using an example. It verifies the superiority of the improved algorithm in the reconstruction of the distribution network. The results show that the method has fast convergence, short optimization time and stable operation. The research provides a reference for the optimization of a distributed power supply connected to the distribution network in China.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184) and Science and Technology Project of Jiangxi Provincial Government (No. 20192BBE50007).

Key words: distributed power supply; minimum network loss; active distribution network; reconfiguration strategy

0 引言

随着可再生能源(风能、太阳能等)发电技术的成熟, 基于可再生能源的分布式发电技术由于其投资成本低、发电方式灵活等优点, 在电力系统中得到了广泛的应用^[1]。随着越来越多的分布式电源接入到电网中, 分布式电源的不确定性可能导致配电网电压大幅波动, 从而导致过电压。这增加了配电网的复杂性, 使得配电网重构变得困难^[2]。但是,

电网并不排斥这些分布式能源。主动配电网可以高效利用可再生能源, 实现双向潮流的灵活控制。因此, 含分布式发电的主动配电网重构策略研究是智能电网研究的热点问题。

配电网重构是配电网优化配置的重要手段。传统的优化技术包括数学优化算法和启发式技术。传统方法在解决大规模配电网结构方面存在局限性, 而人工智能算法不断发展。目前, 国内外学者对分布式电源接入配电网的重构方法进行了大量研究。在文献[3]中, 以能量损失最小化为目标函数, 根据系统负载曲线。考虑需求的变化, 确定重构过程中的切换顺序。在文献[4]中, 建立了分布式电源接入

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477184); 江西省政府科技项目资助(20192BBE50007)

配电网故障恢复的多目标模型。并采用 NSGA-II 方法求解。在文献[5]中, 把广度拓扑遍历搜索算法用于配电网故障恢复方法。使非故障地区掉电后能迅速恢复。此方法可同时用于离线和在线计算。在文献[6]中, 建立了以网损、电压偏差和最小分布式发电损耗为多目标函数的数学模型。同时考虑了分布式电源接入。通过自由排序的粒子群算法对网络进行重建优化。这些研究为分布式电源接入配电网重构提供了理论依据。

在此基础上, 本文提出了一种含分布式电源的主动配电网重构策略。以最小化网损为目标函数, 将改进的教与学优化算法应用于配电网供电路径的快速优化。通过算例验证了改进算法在配电网重构中的优越性。

1 优化模型

1.1 目标函数

风机和光伏的输出受风速和光强度等外部因素影响, 负荷需求主要受人为因素影响, 不是恒定的, 随时间变化的, 并且具有清晰的时间序列特征。将利用多场景技术来处理不确定性, 充分考虑了风机、光伏和负载的时序特性, 进行了合理的场景划分。来反映这个时间段内不同时序曲线的特征。

供电路径优化和重构的目标是最大程度地减少有功网损。由于风机和光伏输出的不确定性, 期望值近似实际功率损耗。因此, 如式(1)和式(2)所示, 有功网损期望值最小化作为目标函数^[7]。

$$\min E = \min \sum_{j=1}^m p_j L_j \quad (1)$$

$$L_j = \sum_{i=1}^l r_i (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / U_{ij}^2 \quad (2)$$

式中: E 为系统有功网损的总期望值; m 为场景数; p_j 和 L_j 分别为为场景 j 时的概率和有功网损期望值; l 为支路总数; r_i 为支路 i 阻抗; P_{ij} 、 Q_{ij} 和 U_{ij} 分别为场景 j 时支路 i 的有功、无功和电压。

1.2 约束条件

目标函数约束条件由支路电流、节点电压、功率平衡和 DG 功率等组成。

(1) 支路电流不得超过线路的热稳定性极限, 支路电流约束如式(3)所示^[8]。

$$S_{ij} \leq S_{ij\max} \quad (3)$$

式中, $S_{ij\max}$ 为支路 ij 最大允许通过量。

(2) 配电网运行时, 节点电压水平必须保持在一定的偏差范围内, 即节点电压必须在电压上限和下

限之内, 节点电压约束如式(4)所示^[9]。

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (4)$$

式中, U_{\min} 和 U_{\max} 为节点 i 的最小和最大电压。

(3) 对整个系统来说, 功率不应小于系统负载和网损和, 且必须满足平衡约束如式(5)和式(6)所示^[10]。

$$P_i + P_{DG_i} = P_{L_i} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$Q_i + Q_{DG_i} = Q_{L_i} + U_i \sum_{j=1}^m U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (6)$$

式中: P_{DG_i} 为分布式电源接入节点 i 的有功; P_{L_i} 为节点 i 负荷的有功; Q_{DG_i} 为分布式电源接入节点 i 无功; Q_{L_i} 节点 i 负荷的无功; U_i 为节点 i 电压; U_j 为节点 j 的电压; G_{ij} 为支路 ij 的电导; B_{ij} 为支路 ij 电纳; θ_{ij} 为节点 i 和 j 的相差角; m 为与节点 i 相联的支路数。

(4) DG 功率约束如式(7)和式(8)所示^[11]。

$$P_{DG\min} < P_{DG_i} < P_{DG\max} \quad (7)$$

$$Q_{DG\min} < Q_{DG_i} < Q_{DG\max} \quad (8)$$

式中: $P_{DG\min}$ 和 $P_{DG\max}$ 为分布式电源接入节点 i 的最小和最大有功功率; $Q_{DG\min}$ 和 $Q_{DG\max}$ 为分布式电源接入节点 i 的最小和最大无功功率。

在本文中, 不必考虑辐射约束, 因为本文通过结合无重复生成树策略来快速优化供电路径。

2 算法研究

2.1 教与学优化算法

教学优化算法是由 Rao 等人在 2010 年提出的一种群体智能优化算法。算法分为教和学两个阶段^[12]。

(1) 教阶段

在这一阶段, 教师会通过若干“教”过程, 以增加学生的学识, 其中, “学识”是由 X_{teacher} 与班级平均水平和教师教学内容构成。每个学生学习能力不同, 从老师那里随机获得知识。如式(9)和式(10)所示^[13]。

$$X_{\text{new}}^i = X_{\text{old}}^i + r_i (X_{\text{teacher}} - TF_i \times \text{Mean}) \quad (9)$$

$$\text{Mean} = \frac{1}{NP} \sum_{i=1}^{NP} X^i \quad (10)$$

式中: X_{new}^i 、 X_{old}^i 分别为学生 i 在教学之前和之后的知识; Mean 为所有学生知识的平均值; TF_i 为教学因子; r_i 学习步骤; X_{teacher} 为班上知识最丰富的学生; NP 为整个种群的粒子数。

(2) 学阶段

在这个阶段, 学生们相互学习, 调整他们的学

习方式来适应学识之间差异,如式(11)所示^[14]。

$$X_{\text{new}}^i = \begin{cases} X_{\text{old}}^i + r_i (X_{\text{old}}^i - X_{\text{old}}^j), f(X_{\text{old}}^j) < f(X_{\text{old}}^i) \\ X_{\text{old}}^i - r_i (X_{\text{old}}^i - X_{\text{old}}^j), f(X_{\text{old}}^j) > f(X_{\text{old}}^i) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $i \neq j$, $f(X_{\text{old}}^i)$ 为第 i 个学生的适应值。

通过“教和学”过程,每个学生都向老师 X_{teacher} 学习。因此所有学生都在靠近 X_{teacher} , 但这种方法使学生的创造性降低(粒子多样性)。开始搜查的时候易陷入局部最优。在“学”阶段,学生可以在互相交流的同时学习,因此学生在学习过程中不会过分依赖老师^[15]。在某种程度上,它可以弥补“教”过程的缺陷。算法步骤如下:

步骤一 初始化主要参数,如学生规模、迭代次数、位置等。

步骤二 初搜索,找到班上学生最高的学生(适应值最高),作为教师 X_{teacher} 。

步骤三 根据式(9)和式(10)在教阶段对学生进行搜索。

步骤四 在整个教学阶段,学生的适应值优于老师,学生的位置得到更新。承认教的效果。否则,可以继续下一步,而不改变当前位置。

步骤五 在学阶段,随机选出学生 X_i 当学习代表。其他学生根据式(11)向他学习^[16]。

步骤六 若不同学生之间互相学习知识有所提高,则更新学生当前位置信息。否则,执行下一步。

步骤七 对算法的终止条件是否满足进行验证,如满足,结束算法并输出最优学生知识(最优适应值)。如果不满足,转到步骤二并重复执行,直到满足条件,结束。

2.2 改进优化算法

针对风力发电机和光伏系统输出的波动性,教学优化算法在处理复杂问题时易陷入局部最优,本文提出改进的教学优化算法,提高运算速度和全局搜索能力^[17]。更适合于配电网供电路径的优化。

(1) 引入自适应教学因子。在改进前教学因子只能为 1 或 0,在教学中学生要么完全理解,要么完全不理解^[18]。但每个学生的学习能力不同,从教师那里获取的知识也不同。学习能力越强学得越快,早期,师生差距较大,学习速度很快,但随着学生水平的提高,学习速度下降。教学因子 TF 决定搜索平均值的变化, TF 越大搜索越快, TF 越小搜索越精细。因此,提出了自适应因子,其随迭代而线性衰减,如式(12)所示^[19]。

$$TF = TF_{\text{max}} - \left(\frac{TF_{\text{max}} - TF_{\text{min}}}{\text{iter}_{\text{max}}} \right) \times \text{iter} \quad (12)$$

式中: iter_{max} 和 iter 分别为最大迭代次数和当前迭代次数; TF_{max} 和 TF_{min} 分别为教学因子的最大值和最小值。

改进 TF 使早期搜索快速收敛到最优解,后期通过精简搜索提高准确性。使算法的搜索可以动态自适应调整。

(2) 增加“自学”阶段。使用原算法,学生对他人的依赖性非常强,使得局部优化的风险增加。本文引入了“自学习”机制。学习方法如式(13)和式(14)所示^[20]。

$$X_{\text{new},k}^i = X_{\text{old},k}^i + r_i \times \text{Progress} \quad (13)$$

$$\text{Progress} = X_{\text{new},k}^i(t) - X_{\text{old},k}^i(t-1) \quad (14)$$

式中, $X_{\text{old},k}^i$ 为 t 次迭代学生科目 k 的成绩。

为了实现网络故障最小化的目标,采用非重复生成树策略,可以快速优化重构分布式电源供电路径^[21]。重构的总体步骤如下:

步骤一 初始化电网参数并输入相关数据。

步骤二 根据划分的时间段,采用相应的方法对分布式电源进行处理。

步骤三 基于简化的配电网,采用无重复生成树策略来生成各种径向网络结构。即不同班级的学生确定初始种群并将其编码。

步骤四 初始化编码,用潮流计算适应度值。然后找到学识最优秀的学生并设置 X_{teacher} 。

步骤五 计算班平均数,实施“教”阶段,按式(9)、式(10)、式(12)教育。通过教,学生知识逐渐增加,位置不断更新。否则,放弃本次教过程。

步骤六 在“学”阶段,学生 X^i 和随机学习对象 X^j 通过式(11)计算适应度值。随着学生知识的提高,更新其位置。否则,终止这一过程。

步骤七 在“自学”阶段,根据式(13)和式(14)自学。随着学生知识的提高,位置不断更新。否则,自学的过程就会终止^[22]。

步骤八 为验证是否满足搜索终止条件,输出最佳适应度并确定当前最优重构方案,否则,转到步骤四。如图 1 所示优化流程图。

3 算例分析

采用如图 2 所示的 PG & E69 节点配电网系统进行分析,验证该算法在具有风机和光伏接入的主动配电网中最优路径搜索的快速性。系统负荷 48 个,负荷随机变量的平均值是节点系统的负荷值。标准差是负荷值 10%。在节点 10、27 和 68 处,并入 3 台 Bonus 1 MW/54 型风机,在节点 34、52 和 56 处接入 4 片光伏阵列 Pilkington SFM144Hx250wp。

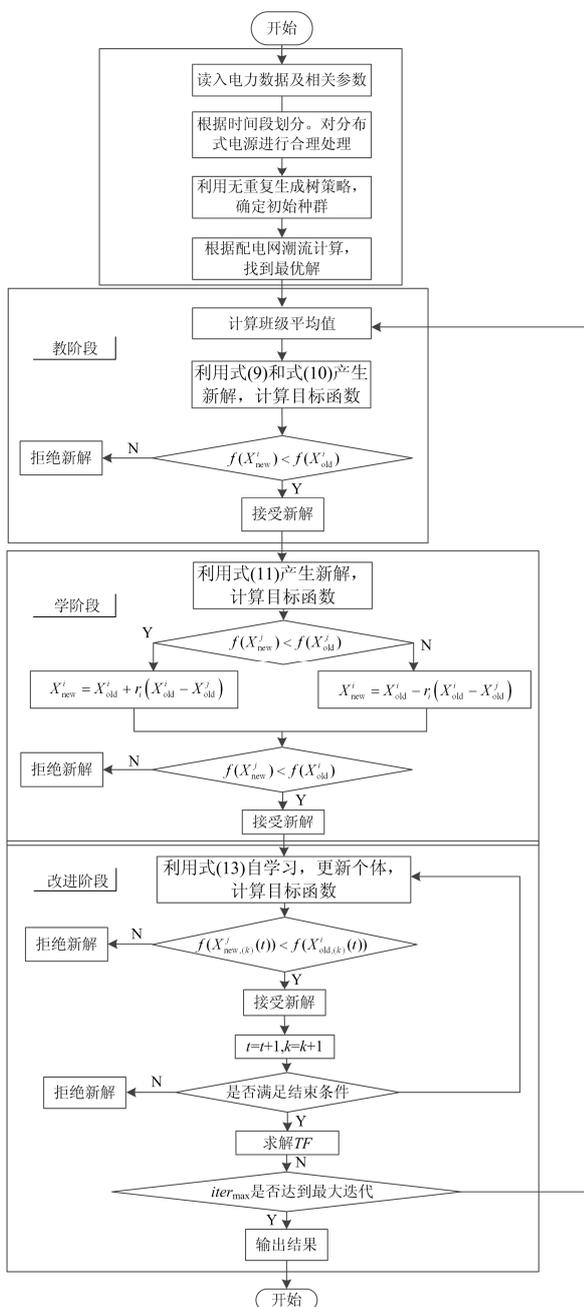


图 1 优化流程图

Fig. 1 Optimization flowchart

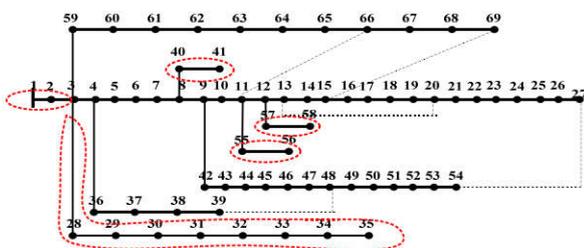


图 2 节点配电系统图

Fig. 2 Node distribution system diagram

使用 HOME 软件模拟了某地区的月平均风速和光度数据。以某一天为例，根据光伏和风能负荷以及接入情况，将一天分为六个场景，如表 1 所示。

表 1 各时间风光接入情况

Table 1 Access situation of PV and wind of each time

用电	普通负荷			光伏	风电
	居民用电	工业用电	农村用电		
00:00-00:06	低	低	低	低	低
06:00-12:06	中	高	高	中	中
12:00-13:06	低	中	低	高	高
13:00-17:06	中	高	低	中	高
17:00-21:06	高	中	高	低	中
21:00-00:06	中	低	低	低	低

通过本文提出的方法可以优化网络供电路径。其中，0 表示没有分布式电源接入，1 表示有分布式电源接入，最低节点电压是在 95%置信度下最低电压置信区间的下限，数据对比如表 2 所示。

表 2 节点开关组合优化前后对比

Table 2 Comparison of node switch combination optimization

算法	开关动作	网损期望/kW	最低节点电压/p.u.
重构前 0	11-66, 13-20, 15-69, 27-54, 39-48	226.65	0.942
重构前 1	11-66, 13-20, 15-69, 27-54, 39-48	194.89	0.961
重构后 1	11-66, 13-20, 14-15, 47-48, 50-51	80.53	1.018

对结果的分析得出结论，重建前分布式电源接入可以减少系统网络的损耗并改善节点电压分布。重构后，系统的总期望网损从 194.89 kW 减少到 80.53 kW，网损减少了 58.68%，将最小节点电压从 0.961 p.u. 提高到 1.018 p.u.，系统的经济性和可靠性得到提高。

如图 3 所示为不同时段的情景电压分布情况。根据风机和光伏输出的时变特性，电压分布在各种场景下会有所不同。基于每个场景的概率，将加权平均电压与重构前的电压进行比较。如图 4 所示，重构节点电压分布均匀、波动小、运行稳定。

与文献文献[21]中改进的教学优化方法进行比较分析，验证本文方法在重构中的快速性。每个方法执行 50 次，最大迭代次数设置为 50。选择最优进化组进行比较，结果如图 5 所示。

搜索和优化过程表明，本文方法迭代可以快速有效地收敛到最优解。

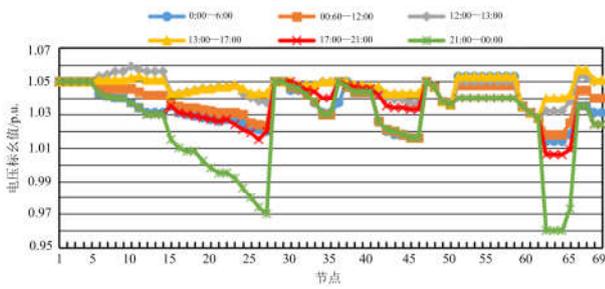


图3 各场景节点电压分布(重构后)
Fig. 3 Voltage distribution of each scene node (after reconstruction)

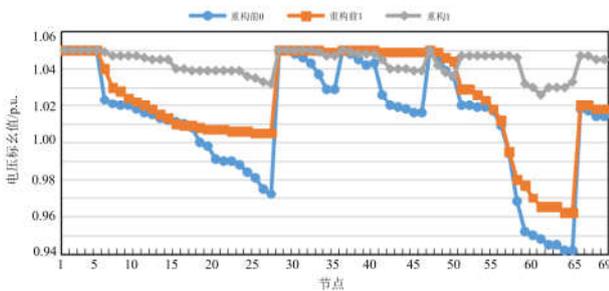


图4 电压期望值(重构前后)
Fig. 4 Voltage expectation (before and after reconstruction)

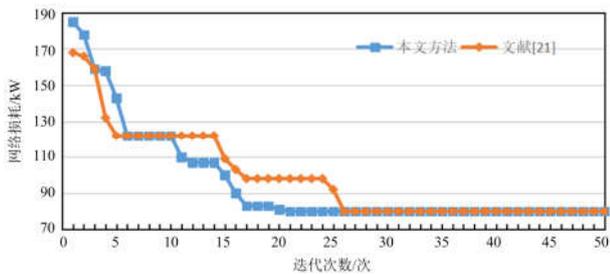


图5 算法进化特性
Fig. 5 Algorithm evolution characteristic

为了证明该方法在优化中的普遍性，以上操作50次取均值，比较结果并进行分析。比较包括网损最优值、平均耗时、均方差、最小迭代次数、寻优率等，最小迭代次数是收敛到最优解的最小迭代次数。优化率是最优解收敛次数与实验总数之比，结果如表3所示。

表3 算法数据比较

Table 3 Algorithm data comparison

算法	改进数与学优化算法	文献[21]
网损最优值/kW	78.53	78.53
平均耗时/s	7.3	12.1
均方差/kW ²	0.134 7	0.264 1
最小迭代次数	6	8
寻优率/%	100	94

由表3可知，所提出的方法具有最小的均方误差和最高的最优率，该方法比其他方法更稳定。在50次计算中，平均时间为7.3s，用时最短。这说明该方法优化速度非常快。根据以上各项测试结果，本文提出的搜索方法收敛速度快、优化时间短、效率高、误差少、运行稳定。

4 结论

本文提出了一种含分布式电源的主动配电网重构策略，并将改进的教学优化算法应用于配电网电源路径的快速优化。通过算例验证了改进算法在配电网重构中的优越性。结果表明，该算法收敛速度快、优化时间短、运算稳定，取得了良好的效果。考虑到当前的实验室设备和数据规模，本文还处于起步阶段。在此基础上，逐步改进和完善将成为下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 王艳松, 孙明鸿. 含微网配电网的综合优化规划研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 118-124.
WANG Yansong, SUN Minghong. Research on integrated optimal planning of distribution network containing microgrid[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 118-124.
- [2] 李江, 刘伟波, 李国庆, 等. 基于序贯蒙特卡洛法的直流配电网可靠性评估与预测[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 154-162.
LI Jiang, LIU Weibo, LI Guoqing, et al. Reliability evaluation and prediction of DC distribution network based on sequential Monte Carlo method[J]. ACTA Energeiae Solaris Sinica, 2018, 39(1): 154-162.
- [3] 姜冬, 刘鲲鹏. 主动配电网双层实时优化博弈研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 50-56.
JIANG Dong, LIU Kunpeng. Research on double-layer real-time optimization game of active distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 50-56.
- [4] 刘杨洋, 苏建徽. 一种分布式电力电子环网拓扑及时钟同步算法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 37-42.
LIU Yangyang, SU Jianhui. A distributed power electronic ring network topology and clock synchronization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 37-42.
- [5] 崔弘, 郭熠昀, 夏成军. 考虑环境效益的分布式电源优化配置研究[J]. 东北电力, 2010, 38(12): 1968-1971.
CUI Hong, GUO Yiyun, XIA Chengjun. Study on distributed power supply optimal configuration considering environmental benefits[J]. Northeast Electric Power, 2010, 38(12): 1968-1971.
- [6] 唐权, 胥威汀, 叶希, 等. 考虑聚合商参与的配电网分布式储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019,

- 47(17): 83-92.
TANG Quan, XU Weiting, YE Xi, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system in distribution network with the participation of aggregators[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 83-92.
- [7] 路畅, 郭力, 柴园园, 等. 含高渗透分布式光伏的增量配电网日前优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 90-98.
LU Chang, GUO Li, CHAI Yuanyuan, et al. Day ahead optimal dispatching method of incremental distribution network with high penetration distributed photovoltaic [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 90-98.
- [8] 杨君, 袁琴, 董君, 等. 基于改进蝙蝠算法对含分布式电源配电网重构研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(1): 124-131.
YANG Jun, YUAN Qin, DONG Jun, et al. Research on distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved bat algorithms[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 124-131.
- [9] 梁唐杰, 谢庆, 柳春芳, 等. 基于全寿命周期理论和云物元理论的配电网规划综合效益的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 12-17.
LIANG Tangjie, XIE Qing, LIU Chunfang, et al. Comprehensive benefit evaluation of distribution network planning based on the life cycle cost theory and the cloud matter element theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 12-17.
- [10] MIRHOSEINI S H, HOSSEINI S M, GHANBARI M, et al. A new improved adaptive imperialist competitive algorithm to solve the reconfiguration problem of distribution systems for loss reduction and voltage profile improvement[J]. International Journal of Electrical Power and Energy, 2014, 40(1): 112-118.
- [11] PENG Sui, ZHANG Yanyan, PENG Hong, et al. Intracellular autocrine VEGF signaling promotes EBDC cell proliferation, which can be inhibited by Apatinib[J]. Cancer Letters, 2016, 12(2): 333-338.
- [12] KHOOBAN, HASSAN M, NIKNAM, et al. A new and robust control strategy for a class of nonlinear power systems: adaptive general type-II fuzzy[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, 2015, 41(6): 22-33.
- [13] YUAN Wenjun, HUANG Zifeng, FU Maozhun, et al. The general solutions of an auxiliary ordinary differential equation using complex method and its applications[J]. Advances in Difference Equations, 2014, 41(1): 111-119.
- [14] GAO Dahai, UPPUGUNDLA N, CHUNDAWAT S P S, et al. Hemicellulases and auxiliary enzymes for improved conversion of lignocellulosic biomass to monosaccharides[J]. Biotechnology for Biofuels, 2011, 4(1): 234-240.
- [15] MOSES V, HATHERLEY R, BISHOP Ö T. Bioinformatic characterization of type-specific sequence and structural features in auxiliary activity family 9 proteins[J]. Biotechnology for Biofuels, 2016, 9(1): 88-94.
- [16] KHORSHIDI Z, HO M T, WILEY D E. Techno-economic evaluation of using biomass-fired auxiliary units for supplying energy requirements of CO₂ capture in coal-fired power plants[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2015, 41(32): 101-110.
- [17] ZHU Ziming, CHEN Xindu, HUANG Shenneng, et al. The process of wavy fiber deposition via auxiliary electrodes in near-field electrospinning[J]. Applied Physics A, 2015, 120(4): 234-241.
- [18] HU Jianjiang, FICHTNER M, BARICCO M. Preparation of Li-Mg-N-H hydrogen storage materials for an auxiliary power unit[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(27): 17144-17148.
- [19] CHOI J H, KIM J C. Network reconfiguration at the power distribution system with dispersed generations for loss reduction[C] // Conference Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 23-27, 2000, Singapore, Singapore.
- [20] 徐礼舟. 含分布式电源的配电网重构研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2017.
- [21] 刘前进, 许慧铭, 施超, 等. 改进教与学方法在电力系统无功优化中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 82-88.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao, et al. Application of improved teaching and learning methods in reactive power optimization of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 82-88.
- [22] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联网的二次设备运维技术研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 177-184.
WANG Liping, PANG Xiaoyan, ZHU Yu, et al. Research and application of secondary equipment operation and maintenance technology based on internet of things and mobile interconnection[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 177-184.

收稿日期: 2019-10-10; 修回日期: 2019-11-26

作者简介:

潘本仁(1983—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为继电保护; E-mail: afc157zc@163.com

王和春(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行分析及继电保护;

张妍(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护整定计算。

(编辑 张爱琴)