

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200623

考虑分布式电源接入的变电站规划关键技术研究

潘晴宇

(国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了解决传统变电站在规划中出现的投资浪费、设备利用率低等问题, 构建了变电站选址定容的全生命周期成本模型。根据分布式电源置信容量评估方法和变电站容量, 基于加权 Voronoi 图的传统变电站规划方法, 提出了分布式电源大规模接入变电站的优化规划方法。通过算例对所提方法的科学性和实用性进行验证。实验证明: 所提方法可以有效地降低电网的规划容量, 提高电网精细化水平, 具有较好的实用性。

关键词: 变电站; 分布式电源; 成本模型; 置信容量; 规划方法

Research on key technologies of substation planning considering distributed power access

PAN Qingyu

(Yangzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

Abstract: There can be problems of waste of investment and low equipment utilization in traditional substation planning. To help solve these problems a full life cycle cost model for substation location and capacity is constructed. We take the confidence capacity evaluation method of distributed power sources and the capacity of substations, and the traditional substation planning method based on the weighted Voronoi diagram. From this we develop an optimized planning method for large-scale access of distributed power sources to substations. The validity and practicability of the proposed method are verified by calculation examples. Experiments show that the proposed method can effectively reduce the planned capacity of the power grid, improve the level of refinement of the power grid, and has good practicability.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. J2018063).

Key words: substation; distributed power supply; cost model; confidence capacity; planning method

0 引言

随着我国经济的迅速发展, 人们的生活质量得到了进一步的提高^[1]。为了满足日益增长的用电需求, 需要不断新建变电站, 扩大电力系统规模^[2]。变电站规划是电网规划中最重要的一环, 选择新变电站的位置和供电范围时, 需要对诸多因素进行科学合理考虑, 才能有效地避免在电网中的跨区域交叉供电, 降低建设成本, 提高电网效率^[3]。因此, 科学合理的规划对电网的经济可靠性和安全性变得至关重要。

目前, 智能变电站选址在理论和实践上取得了许多突出的成就。在文献[4]中, 根据单源、多源连续位置计算模型, 在不同的原则下, 构建一个新的组合模型, 并将其应用于变电站选址。在文献[5]中,

在考虑到地理空间信息因素和其他不确定因素的情况下, 通过电网 GIS 系统的信息管理和空间分析, 确定备选站址的关键指标和数据处理准确性。在文献[6]中, 引入了地理因素对变电站选址投资成本的影响因子进行建模, 改进后的微分进化算法用于求解模型。在文献[7]中, 根据设备生命周期成本建立了变电站选址定容模型, 采用 Arc GIS 的空间分析函数用于识别地理因素在选址定容过程中的局限性, 提高规划效率。综上所述, 文献中没有考虑到分布式电源接入的情况, 这些研究为变电站选址定容提供了理论依据。

针对传统变电站规划存在的问题, 文中根据全生命周期成本构建了变电站选址定容模型, 结合分布式电源置信容量评估方法和变电站容量, 提出适用于分布式电源大规模接入的变电站优化方法, 并通过算例验证该方法的有效性和准确性。

1 变电站规划模型

新建变电站的周期成本应由初期投资成本、运维成本和不能工作拆除成本,第1段总费用 C_1 、第2段总费用 C_2 、第3段的总费用 C_3 。整个变电站过程中总费用如式(1)所示^[8]。

$$LCC_1 = \sum_{i=1}^n \left\{ C_1(S_i) + \sum_{t=1}^T C_2(S_i) T \times \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^t + C_3 S_i \times \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^T \right\} \quad (1)$$

式中: $C_1(S_i)$ 、 $C_2(S_i)$ 、 $C_3(S_i)$ 分别为第*i*个变电站初始费用、运维费率、废物回收成本, T 为变电站的使用寿命; S_i 为第*i*个变电所的容量; R 为社会贴现率; r 为通货膨胀率。

在低压出线费用方面,同样也是三个阶段。出线成本几乎占了第一阶段的全部成本。每单位长度的成本是根据线的总长度计算的,得到总成本。用式(2)表示该阶段的总成本^[9]。

$$C_4 = \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} k_{ij} l_{ij} \quad (2)$$

式中: α_1 为出线单位的成本; k_{ij} 为固定系数; l_{ij} 为距离, $l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, x 和 y 为负荷点的坐标, l_{ij} 小于变电站的供电半径 R_i 。

低压侧线路的运行支出必须考虑相关的基数和整个线路范围等。本阶段支出总费用如式(3)所示。

$$C_5 = \beta_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} W_j^2 k_{ij} l_{ij} = \frac{\beta_{11} \beta_{12} \beta_{13}}{U_1^2 \cos^2 \phi} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} W_j^2 k_{ij} l_{ij} \quad (3)$$

式中: W_j 为负荷点*j*的有功负荷; β_1 为线路上发生的损耗; β_{11} 为这个阶段的带电情况; β_{12} 为平均1000 m线路电阻; β_{13} 为低压线路在一个时期消耗时长; U_1 为电压; $\cos \phi$ 为相关系数。

由于拆卸不能正常运行的成本如式(4)所示。

$$C_6 = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in J_i} (a-b) k_{ij} l_{ij} \quad (4)$$

式中, $a-b$ 为平均每千米所需要费用和残差值之间的差。

3个阶段的最终总成本如式(5)所示^[10]。

$$LCC_2 = C_4 + \sum_{t=1}^{T'} C_5 \times \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^t + C_6 \times \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{T'} \quad (5)$$

式中, T' 为具体使用年限。

目标函数是站间联络和变电站结合,同时确保最小化配电网规划的成本,联络线路初始投资通常用于新建联络线路,其成本为线路长度和单线投资

成本,如式(6)所示^[11]。

$$C_7 = \gamma_1 \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ij} n_{ij} k_{ij} l_{ij} \quad (6)$$

式中: N 为待建变电站的数量; γ_1 为联络线路每千米建设成本; a 为联络判断矩阵, $a_{ij} = 0$ 没有联络, $a_{ij} = 1$ 存在联络; n_{ij} 为两站联络线路数量,如式(7)所示联络线路报废成本^[12]。

$$C_8 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} n_{ij} (c-d) k_{ij} l_{ij} \quad (7)$$

式中: c 为变电站低压线路每千米报废成本; d 为联络线路产生的每千米残值。

总的联络成本是通过整合两个阶段来计算的。如式(8)所示^[13]。

$$LCC_3 = C_7 + C_8 \left(\frac{1+r}{1+R} \right)^{T''} \quad (8)$$

式中, T'' 为联络线使用年限。

根据以上所述,如式(9)所示变电站和站间联络的联合优化的数学模型^[14]。

$$\min LCC = LCC_1 \times \lambda_g + LCC_2 + LCC_3 \quad (9)$$

式中, λ_g 为第*g*个方案的间接成本因子。

2 规划方法

2.1 分布式电源置信容量评估方法

容量置信度是评估分布式电源容量水平的重要指标。目前,对置信容量的评估没有统一标准。国内学者采用较多的方法是从系统可靠性评估。

目前,在这个研究领域,使用较多的是等效容量和ELCC,集中在充裕度上。另外,基于总容量 G 的结构,承载能力为 L 。无论从何种观点来看,都需要将DG等效为常规电源的输出,从而获得置信容量 G_C ,并且将 G_C 和DG的装机容量比作为分布式电源的置信度,如式(10)所示^[15]。

$$CC = \frac{G_C}{G_D} \quad (10)$$

式中, G_D 为分布式电源的装机容量。

评估标准应反映分布式电源对系统年度可靠性的贡献。如果年度系统的可靠性 R_y 不变,并且能够承受相同的ELLCC。分布式电源的置信容量如式(11)所示^[16]。

$$G_R = f_2^{-1}(R_y, L + \Delta L_y) - G \quad (11)$$

置信度如式(12)所示^[17]。

$$CC = \frac{G_R}{G_D} \quad (12)$$

式中： ΔL_y 为基本维持置信程度； f'_2 为通过模拟获得的相关函数； G 为系统的原容量； L 为承载能力。

容量置信度计算由三部分组成。第一部分完成系统可靠性评估模型的建立^[18]。第二部分是保证可靠性的情况下，计算外负荷能力 L 。最后，利用相同的可靠性计算负荷能力下的置信容量 G_R ，步骤如下：

- 步骤一 构建数据模型。
- 步骤二 测量分布式电源以外的部分，得到 R_y 。
- 步骤三 分布式电力接入系统的可靠性计算。
- 步骤四 获得最终结果 R_y 。根据相关计算方法，

改变负载范围，计算 ΔL ^[19]。

步骤五 遵循 $L + \Delta L$ 相关标准。 R_y 作为最终的标准值，将执行一系列重复的反馈过程，计算 G_R 和 CC 。

2.2 联合优化规划方法

根据变电站规划中的变电站址定容数据，采用两阶段优化规划方法，改进了变压器与主变压器之间的联络关系，使整个区域更经济、更高效^[20]。第一阶段的主要内容是建立变电站的整体联络布局，第二阶段是优化主变压器总体联络的通道。以上两部分对建立主变压器之间的联络通道起到了重要作用。步骤如下：

步骤一 根据现有变电站相关参数，可以得到组合方案。

步骤二 在规划区使用加权 Voronoi 图算法，对各方案进行规划，得到站址和容量作为初始解^[21]。

步骤三 在各站之间建立联络数据。

步骤四 根据“后退寻优”对主变电站联络关系进行优化，确定主变负荷率。

步骤五 根据新变电站主变压器的负载速率，采用加权 Voronoi 图方法重新划分各变电站的供电区域。

步骤六 根据新的供电范围确定变电站的位置。

步骤七 输出变电站相关数据。如果所有方面都已遍历过，转到步骤八。否则，转到下一个方案并转到步骤二。

步骤八 对 N 种方案结果按成本排序，最低成本方案作为最终方案。流程图如图 1 所示。

2.3 考虑分布式电源的变电站优化规划方法

Voronoi 图算法广泛应用于气象学、地址、建筑、信息等领域。Voronoi 图在设备选址方面具有计算速度快、收敛性好、精度高等优点^[22]。文中将根据传统的 Voronoi 图添加权重影响系数。该模式通过调整权重完成变电站选址定容。

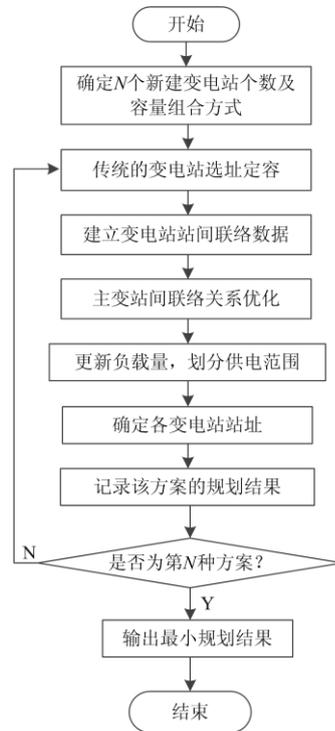


图 1 优化流程

Fig.1 Optimization process

由于变电站负载受到限制，因此整个结构的设计以周期成本最小进行。文中考虑了变电站供电区域分布式电源的置信容量。结合加权 Voronoi 算法，得到了有源配电网的最优规划方案，步骤如下：

步骤一 首先，根据相关参数，确定新建变电站的组合方案。

步骤二 所选变电站的最大数量如式(13)所示。最小数量与置信度密切相关，置信度一般在 5%~30% 之间。因此，如式(14)可获得新变电站的最小数量^[23]。

$$n_{\max} = \frac{\sum P - \sum P_{AP}}{(S_y)_{\min} \cos \phi} \quad (13)$$

$$n_{\min} = \frac{\sum P - \sum P_{AP}}{(S_y)_{\max} \cos \phi \times 40\% + G_D \times 30\%} \quad (14)$$

式中： $\sum P$ 为总有功负荷； $\sum P_{AP}$ 为变电站总有功功率； $(S_y)_{\min}$ 和 $(S_y)_{\max}$ 分别为新变电站的最小和最大经济容量(变电站的总容量×负荷率)。

步骤三 对变电站供电范围内可靠性指标进行计算，缺电时间期望如式(15)、式(16)所示^[24]。

$$LOLE = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N P_i P_j I_{ij} \times T \quad (15)$$

$$I_{ij} = \begin{cases} 0, & L_i \leq G_j \\ 1, & L_i > G_j \end{cases} \quad (16)$$

式中： L_i 为某一级实际功耗； G_j 为第 j 级的最大发电容量； P_i 为某一级实际功耗的发生概率； P_j 为第 j 级最大发电能力发生概率； N 为全部级数； T 为各级负荷总时长^[25]。

步骤四 对分布式电源可靠性指标和置信容量进行计算。

步骤五 更新变电站容量,采用变电站有功和分布式电源置信容量作为变电站等效有功容量,并根据模型对变电站选址定容。

步骤六 所有变电站移动低于设置的阈值。不改变变电站的容量继续执行下一步,否则,下次迭代,转到步骤三。

步骤七 输出变电站相关数据。如果已经遍历了所有方案,转到步骤八。导入下一个方案并转到步骤二。

步骤八 根据成本对 N 种方案进行排序,选择成本最低方案。规划流程如图 2 所示。

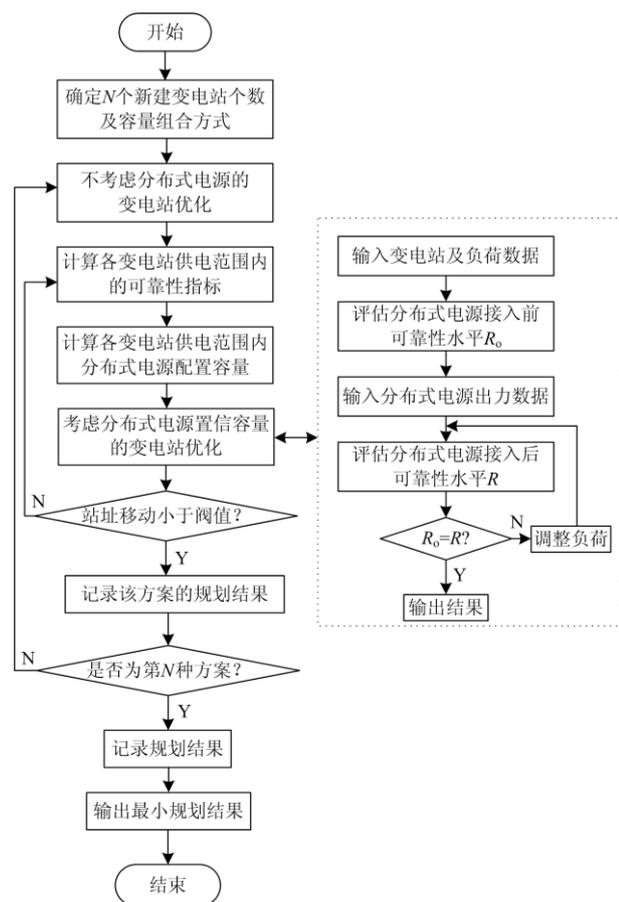


图 2 规划流程

Fig. 2 Planning process

3 算例分析

文中以某地区配电变电站选址定容为例,这一区域总面积约 63 km^2 ,处于发展阶段。根据相关的建筑设计方案,分为 368 个板块,分析各部分的具体情况。年度负荷数据统计接近 745 MW 。表 1 所示该地区备选变电站的容量。

表 1 变电站规格

Table 1 Substation specification

变电站规格	C_1 (万元/座)	C_2 (万元/座)	C_3 (万元/座)
2×40 MVA	2 200	45	0.9
2×50 MVA	2 500	50	1
3×40 MVA	3 200	65	1.3
3×50 MVA	3 600	72	1.45

10 kV 低压出线电缆型号为 YJV-3×400, 每公里线长成本是 70 万元,每公里拆卸成本是 100 元^[26]。目前电费 $\beta_{11} = 0.49 \text{ 元/kWh}$, 低压出现每公里电阻 $\beta_{12} = 460 \Omega/\text{km}$, 线路年损耗时间 $\beta_{13} = 4 700 \text{ h}$, 运营 30 年,通货膨胀率 $r = 2.5\%$, 社会贴现率 $R = 6.5\%$ 。

根据上述内容,在加权 Voronoi 图算法规划的基础上,建立了具有 $3 \times 50 \text{ MVA}$ 容量的 8 座变电站和具有 $3 \times 40 \text{ MVA}$ 容量的 1 座变电站,变电站的电压为 110 kV。图 3 所示为规划结果。



图 3 加权 Voronoi 图算法规划图

Fig. 3 Weighted Voronoi drawing

规划区光伏发电额定容量预测为 250.5 MW , 风机总数 378 台,额定容量 35 kW , 风机风速 2.5 m/s , 额定风速 12.5 m/s , 切出风速 25 m/s , 平均风速 19.56 km/h , 风速分布标准差 10.06 km/h , 光伏模型参数: 额定光强度为 19.56 kW/m^2 。

采用联合优化算法,不考虑分布式电源的影响,对规划区域变电站的容量进行优化。建设容量为 3×50 MVA 的变电站 7 座。图 4 所示为规划结果。



图 4 变电站与站间联络联合优化结果

Fig. 4 Joint optimization result of substation and station communication

在考虑分布式电力接入时,以得到的可靠度指标作为该方法的可靠度标准,并且所有负荷都被认为是居民负荷。文中变电站规划结果如图 5 所示,由于图中各站之间的关系比较复杂,图中未标出各站之间的联络关系,各站之间的联络关系如表 2 所示。规划结果如表 3 和表 4 所示。

由表 3 和表 4 数据可知,在考虑分布式电源出力后,变电站的容量减少,但可靠性参数没有增加,变电站和线路的投资和维护成本大大降低。无分布式电源的规划成本为 90 721.2 万元,考虑到分布式电源出力贴现年成本 55 448.6 万元。

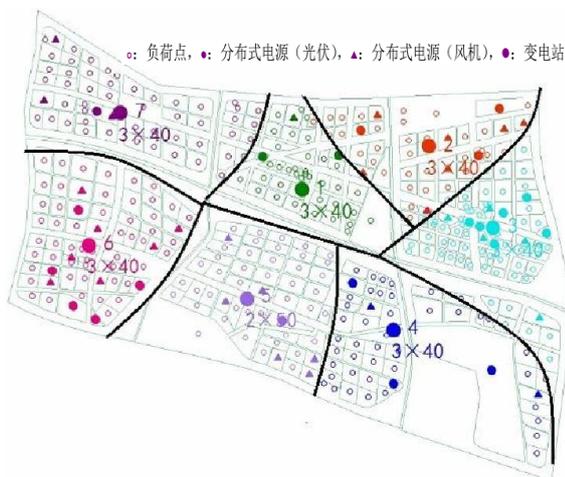


图 5 变电站选址定容(考虑置信容量)

Fig. 5 Substation siting and sizing (considering confidence capacity)

表 2 站间联络关系

Table 2 Inter-station relationship

联络容量/MVA	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
1#	—	12.5	—	—	8.9	—	—
2#	12.5	—	12.5	—	—	—	—
3#	—	12.5	—	12.5	—	—	—
4#	—	—	12.5	—	8.9	—	—
5#	8.9	—	—	8.9	—	—	—
6#	—	—	—	—	—	—	10.0
7#	—	—	—	—	—	10.0	—

表 3 变电站选址定容 1(考虑置信容量)

Table 3 Substation siting and sizing 1 (considering confidence capacity)

编号	1#	2#	3#	4#
变电站容量/MW	3×40	3×40	3×40	3×40
光伏电源/MW	19.415	33.41	51.825	36.13
风机/台	49	46	95	78
LOLE/MW	19.351	28.083	30.738	27.425
置信容量/MW	7.51	10.83	9.47	9.94
置信度/%	14.06	8.54	15.63	18.75

表 4 变电站选址定容 2(考虑置信容量)

Table 4 Substation siting and sizing 2 (considering confidence capacity)

编号	5#	6#	7#
变电站容量/MW	2×50	3×40	3×40
光伏电源/MW	31.335	58.64	19.355
风机/台	13	84	13
LOLE/MW	31.525	26.102	24.017
置信容量/MW	2.96	3.14	2.59
置信度/%	4.98	13.28	10.94

可靠性指标用于确定变电站容量设置是否合适。目的是保持可靠性指标的同时,通过降低新变电站的容量来节省投资。

4 结语

文中构建了变电站选址定容的全生命周期成本模型,根据分布式电源置信容量评估方法和变电站容量,提出了分布式电源大规模接入变电站的优化规划方法。并通过算例验证所提方法的有效性和准确性,结果表明,分布式电源的容量值不能忽视,这一值被纳入电力平衡计算中,降低了变电站的规划容量,进而降低了变电站的建设成本。考虑到目前的实验设备和数据规模,文中尚未进入实用阶段,还有很多工作需要完成。在此基础上,逐步改进和

完善将成为下一步的重点。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 刘科研, 盛万兴, 张东霞, 等. 智能配电网大数据应用需求和场景分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 287-293.
LIU Keyan, SHENG Wanxing, ZHANG Dongxia, et al. Big data application requirements and scenario analysis in smart distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 287-293.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 曾卫东, 田爽, 袁亚辉, 等. 垃圾焚烧炉自动燃烧控制系统设计与实现[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 109-113.
ZENG Weidong, TIAN Shuang, YUAN Yahui, et al. Design and implementation of automatic combustion control system for waste incinerator[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 109-113.
- [6] 裘愉涛, 胡雪平, 凌光, 等. 国网公司智能变电站继电保护标准体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 7-13.
QIU Yutao, HU Xueping, LING Guang, et al. Research on relay protection standard system of intelligent substation of state grid corporation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 7-13.
- [7] 付忠广, 刘炳含, 王鹏凯, 等. 燃气电厂性能指标综合评价模型[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 7-21.
FU Zhongguang, LIU Binghan, WANG Pengkai, et al. Comprehensive evaluation model for performance indicators of gas-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 7-21.
- [8] 王冬青, 李刚, 何飞跃. 智能变电站一体化信息平台的设计[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 20-25.
WANG Dongqing, LI Gang, HE Feiyue. Design of integrative information platform for smart substations[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 20-25.
- [9] 杨引虎, 罗建勇, 韦远涛, 等. 分布式电缆局部放电在线监测系统的研制[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 91-100.
YANG Yinhu, LUO Jianyong, WEI Yuantao, et al. Development of distributed cable partial discharge online monitoring system[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 91-100.
- [10] 张金江, 郭创新, 曹一家. 基于 MAS 的变电站信息一体化嵌入式平台设计[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 52-56.
ZHANG Jinjiang, GUO Chuangxin, CAO Yijia. Design of embedded platform for substation data integration based on multi-agent system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 52-56.
- [10] 杨志宏, 周斌, 张海滨, 等. 智能变电站自动化系统新方案的讨论[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 1-7.
YANG Zhihong, ZHOU Bin, ZHANG Haibin, et al. Discussion on novel scheme of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 1-7.
- [11] NAHMAN J, SALAMON D. Mutual interference of neighboring grounding systems and approximate formulation[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 41(12): 151-156.
- [12] 刘孝刚, 施琳, 张帆, 等. 智能变电站二次安措策略自动生成和在线校核技术[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 82-89.
LIU Xiaogang, SHI Lin, ZHANG Fan, et al. Automatic generation and online calibration technology for smart substation secondary safety policy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 82-89.
- [13] 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.
- [14] KHOOBAN M H, NIKNAM T. 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.
- [15] PATEL G K, DABHI V K, PRAJAPATI H B. Clustering

- using a combination of particle swarm optimization and K-means[J]. *Journal of Intelligent Systems*, 2017, 12(3): 457-469.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] GAUTAM J V, PRAJAPATI H B, DABHI V K, et al. Empirical study of job scheduling algorithms in Hadoop MapReduce[J]. *Cybernetics and Information Technologies*, 2017, 21(1): 146-163.
- [20] 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.
- [21] 唐耀华, 郭为民, 崔杨. 水-火发电机组频率控制策略研究[J]. *中国电力*, 2020, 53(6): 153-161.
TANG Yaohua, GUO Weimin, CUI Yang. Study on frequency control strategy of water thermal power unit[J]. *Electric Power*, 2020, 53(6): 153-161.
- [22] 王利平, 庞晓艳, 朱雨, 等. 基于物联网和移动互联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.
- [23] 郭升, 童晓阳, 王洪彬. 计及设备老化与计划检修的智能变电站保护系统可靠性评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(9): 97-104.
GUO Sheng, TONG Xiaoyang, WANG Hongbin. Reliability evaluation method of intelligent substation protection system considering equipment aging and planned maintenance[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(9): 97-104.
- [24] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于Markov模型与GO法的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 47-55.
YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of intelligent substation relay protection system based on Markov model and go method[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 47-55.
- [25] 李云波, 张子立, 张晋宾, 等. 基于区块链的分布式微电网交易与能源调度研究[J]. *华电技术*, 2020, 42(8): 24-31.
LI Yunbo, ZHANG Zili, ZHANG Jinbin, et al. Research on distributed microgrid transaction and energy scheduling based on blockchain[J]. *Huadian Technology*, 2020, 42(8): 24-31.
- [26] 顾志祥, 孙思宇, 孔飞, 等. 燃气冷热电分布式能源系统设计优化综述[J]. *华电技术*, 2019, 41(3): 8-13, 42.
GU Zhixiang, SUN Siyu, KONG Fei, et al. Design optimization of gas cooling, heating and power distributed energy system[J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(3): 8-13, 42.

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-07-30

作者简介:

潘晴宇(1977—), 女, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向为电力变电运维管理、电力项目管理等。E-mail: hfxv3579@163.com

(编辑 张爱琴)