

基于分布式光伏接入的台区可开放容量测算方法研究

向加佳, 周 灿, 黄 頔, 曾红艳

(长沙电力职业技术学院(国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心), 湖南 长沙 410131)

摘要: 分布式光伏是构建以新能源为主体的新型电力系统的重要电源之一, 分布式光伏的迅猛发展给配电网的接入与消纳带来了严峻挑战。配电网台区作为分布式光伏最广泛的接入点, 面临着巨大接入压力。基于分布式光伏接入台区探讨了台区可开放容量测算方法。首先分析了光伏出力和负荷的耦合特性, 提出典型台区的耦合评价系数; 然后基于电压约束、配电变压器经济负载分析了台区的分布式光伏可开放容量, 最后进行了分布式光伏接入后的台区安全性校验。为配电网的规划、建设和运行以及分布式光伏的有序开发提供参考和依据, 对新型电力系统的建设具有重要意义。

关键词: 分布式光伏; 台区; 可开放容量; 测算; 约束

Research on calculation method of openable capacity of distributor transformer based on distributed photovoltaic access

XIANG Jiajia, ZHOU Can, HUANG Di, ZENG Hongyan

(Changsha Electric Power Technical College (State Grid Hunan Technical Skills Training Center), Changsha 410131, China)

Abstract: Distributed photovoltaic (PV) is one of the important power sources to build a new power system with new energy as the main body. The rapid development of distributed PV has brought severe challenges to the access and consumption of the distribution network. As the most extensive access point of distributed PV, the distributor transformer faces great access pressure. This paper discusses the method of calculating the open capacity of distributed photovoltaic access distributor transformer. Firstly, the coupling characteristics of photovoltaic output and load are analyzed, and the coupling evaluation coefficient of typical electricity transformer is proposed. Then, based on the voltage constraint and the economic load of the distributed PV distribution, the open capacity of the distributed PV distribution was analyzed, and the security of the distributed PV distribution was verified. It will provide reference and basis for the planning, construction and operation of distribution network and the orderly development of distributed photovoltaic, which is of great significance for the construction of new power system.

Key words: distributed photovoltaic; distributor transformer; openable capacity; calculation; constraint

0 引言

在国家“双碳”和新型电力系统建设大背景下，国家相关部门和地方政府陆续出台了一系列政策，加快推动分布式光伏市场开发，挖掘全国各级光伏市场潜力。鉴于分布式光伏主要分布在广大农村以及城郊的特点，其商业模式多为“自发自用、余电上网”，主要在10 kV及以下接网，其中又以台区及以下接网为主^[1-2]。根据《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》及电力系统安全稳定运行相关规定，分布式光伏并网发电应遵循分散开发、就近消纳为主的原则^[3]。因此，分布式光伏对于配电变压器台区的需求和冲击相当大，为保证配电网安全稳定运行且尽可能满足分布式光伏并网，及时准确地公布台区可开放容量具有重要意义。台区可开放容量也受到政府、光伏发电企业和电网企业等多方面的高度关注。

业界满足电能质量要求和设备容量约束的配电网分布式光伏最大准入容量，即可开放容量，并且进行了大量的研究^[4]。主要分为数学建模和随机场景分析两大类。数学建模的方法通常将光伏可开放容量转化为非线性规划问题，具有准确度高的优点，但建模和求解过程往往繁杂无比^[5-8]；随机场景分析法是基于分析结果量化随机模拟过程，优点是能模拟各类光伏接入场景，但需要进行大量的迭代和潮流计算^[9-11]。配电网可开放容量一般分为区域级和设备级，从现有文献来看，大量研究主要聚焦在配电网区域级的分布式光伏承载能力和消纳能力研究，具体到设备级的研究也是基于变电站和10 kV线路，鲜有文献将研究重点放在配电变压器台区的可开放容量测算上。实际上，台区的可开放容量关系到各方利益，其测算准确度及公布及时性成为当下电网必须正视的课题。

本文从光伏出力与台区负荷的耦合特性、台区的电压约束、经济性约束和安全校验等方面进行分析研究，提出了台区分布式光伏可开放容量测算方法，并进行了具体的算例分析。该方法给

出了不同容量、不同半径和不同光伏接入点等各种情况下典型台区的分布式光伏可开放容量测算参考值，具有极强的工程实用价值。

1 测算思路

现阶段，配电网尚属于传统的单向潮流配电网，大规模接入具有间歇性、随机性等特点的分布式光伏时，部分节点的负荷特性转变为电源特性，而不同台区的负荷呈现出不同的特性。因此，本文将根据负荷类型对台区进行分类，综合考虑光伏出力与台区负荷耦合特性、台区设备综合约束（包括电压约束、安全性约束和经济性约束），分析台区分布式光伏可开放容量。

根据光伏资源特点，分布式光伏开发主要集中在城镇和农村建筑屋顶、工矿用地屋顶、铁路高速公路、滩涂水库坑塘和农业大棚等地方，结合台区负荷特性，契合国家能源局综合司下发的《关于报送整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点方案的通知》要求，将台区负荷分为党政机关、公共建筑（学校、医院和村委会等）、工商业和农村居民四类。

结合光伏出力典型日曲线，将此四类负荷折算到光伏最大出力时刻进行耦合分析，再进行台区设备的综合性分析，确保电能质量、运行安全可靠性和经济性，综合确定台区的分布式光伏可开放容量。测算思路及流程归纳如图1所示。

2 测算方法

2.1 光伏出力与负荷特性耦合分析

光伏最大出力与台区最大负荷时刻并不同步，为准确刻画台区潮流方向，从用电信息采集系统选取党政机关、公共建筑（学校、医院和村委会等）、工商业和农村居民等典型负荷的最大负荷日曲线，与典型光伏出力日曲线进行耦合分析，以耦合系数将台区最大负荷折算至与光伏，并用光伏出力减去折算后的台区负荷，进而反映出最真实的上送功率。经过耦合分析，最终确定各类负荷的耦合系数，见表1。

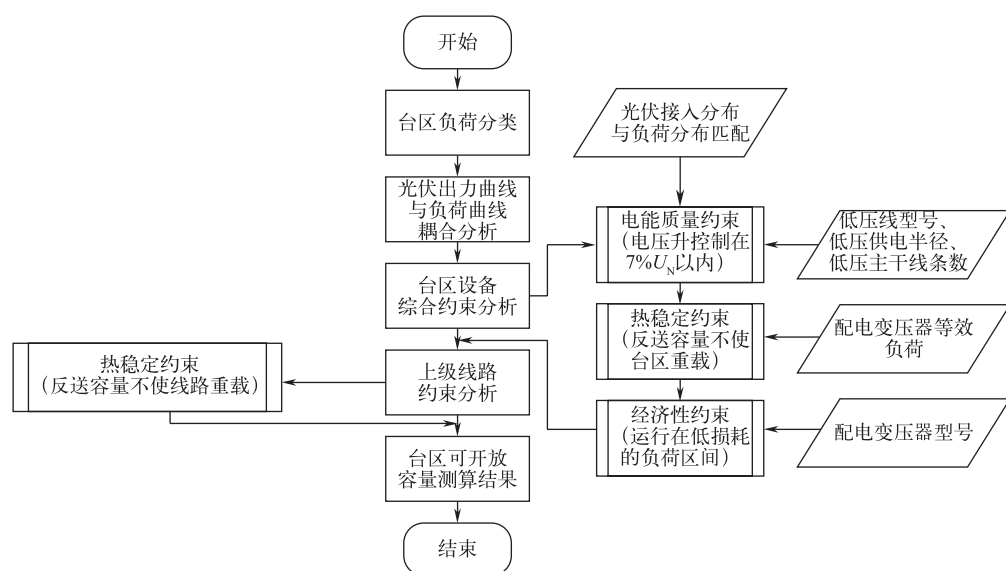


图1 台区可接入容量测算流程图

Fig. 1 Flow chart for calculating the accessible capacity of a substation area

表1 常见负荷类型与光伏耦合系数

Tab. 1 Common load types and photovoltaic coupling coefficients

负荷类型	负荷耦合系数
政府	0.87
村委会	0.80
医院	0.78
学校	0.86
商业	1
工业	0.72
乡村居民	0.71

2.2 光伏接入后台区的安全性校验

根据DL/T 2041—2019《分布式电源接入电网承载力评估导则》要求，光伏接入以后，台区反向负荷率需以电网输变电设备热稳定不超限为原则。热稳定评估应根据电网运行方式、输变电设备限值、负荷情况、发电情况和分布式电源出力特性等因素计算反向负荷率。设备运行裕度系数一般取0.8，于台区而言，即保证台区反向不重载。台区安全性校验表达式为

$$\bar{S} = \begin{cases} S_G & S_G \leq 0.8S \\ 0.8S & S_G > 0.8S \end{cases} \quad (1)$$

式中， S_G 为满足电压约束下的台区理论上送容量； S 为台区额定容量； $\bar{S}$ 为满足台区安全性校验的台区最大上送功率。

2.3 基于电压约束的台区光伏开放容量

分布式光伏最大接入容量的约束条件为电压不越上限，可以保证各用户节点的电压都不超过上限。各节点电压与 U_0 、 P 、 Q 、 R 和 X 相关， ΔP 、 ΔQ 为变压器和线路损耗与配变容量和线路阻抗呈线性关系。对于线路阻抗 R 、 X ，有

$$R = \frac{rl}{A} \quad (2)$$

$$X = 2\pi fLl = m_0 fL \left(\ln \frac{2l}{A} - 1 \right) \quad (3)$$

式中， l 为线路长度； A 为线径面积； m_0 为常数； L 为电感。

由于线路长度与线径面积波动范围较小，可认为 R 、 X 与 l 、 A 在该范围内近似呈线性，即节点电压与 l 、 A 为近似线性关系。因此线路可接入容量与导线型号、供电半径、功率因数和负荷率有密切关系。

当分布式光伏集中位于线路末端，对于线路电压提高的效果最为明显，线路末端更容易出现高电压问题。按照电能质量规定：20 kV及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$ ，通过调整低压线路的供电半径、功率因数、导线型号以及光伏接入位置，分别计算可接入的最大光伏

容量。

当负荷集中于线路末端,假设主干线总阻抗为 $R+jX$,末端负荷视在功率为 $S=P+jQ$,则主干线上的电压总损耗为

$$\Delta U = \frac{PX + QR}{U_N} = \frac{SrL \cos \alpha}{U_N} \left(1 + \frac{x}{r} \tan \alpha\right) \quad (4)$$

台区的电压约束即为线路电压降应满足导则要求。传统台区电压是由首端向末端线路逐渐降低,但光伏接入且光伏倒送以后,台区电压由接入点向两端逐渐降低。当接入点位于台区末端时,台区末端电压最高,向前逐步降低,与传统台区电压损耗过程相反。

为保证台区电压的稳定性,将变压器出口电压调整至一个固定档位,本研究取为 U_N 。根据导则要求,台区末端电压不能超过 $1.07 U_N$,线路上的电压降 ΔU 边界为 $0.07 U_N$ 。由式(4)可知

$$S_G = \frac{\Delta U U_N}{rL \cos \alpha \left(1 + \frac{x}{r} \tan \alpha\right)} \quad (5)$$

分布式屋顶光伏优先就近为安装点负荷供电, S_G 为满足电压约束下的台区理论上送容量,考虑台区安全性校验,确定台区光伏开放容量 S' 的计算式为

$$S' = \bar{S} + kP_1 \quad (6)$$

式中, k 为负荷与光伏耦合系数; $\bar{S}$ 为最大上送功率; P_1 为增加台区负荷功率。

若线路负荷、线路长度、功率因素及线路型号已知,便可估算出台区理论光伏开放容量。当负荷均匀分布于线路时,线路负荷密度曲线如图2所示。

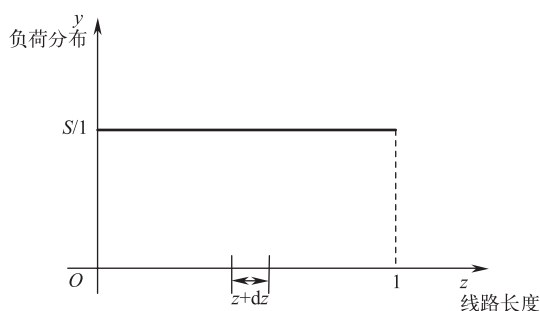


图2 线路负荷密度曲线
Fig. 2 Line load density curve

对于距线路首端 z 处的微分段上的电压损耗 ΔU_z 为

$$\Delta U_z = \left(\frac{L-z}{L}\right) \frac{Sr \cos \alpha}{U_N} \left(1 + \frac{x}{r} \tan \alpha\right) dz \quad (7)$$

$$\Delta U = \int_0^L \Delta U_z = \frac{SrL \cos \alpha}{2U_N} \left(1 + \frac{x}{r} \tan \alpha\right) \quad (8)$$

$$S_G = \frac{2\Delta U U_N}{rL \cos \alpha \left(1 + \frac{x}{r} \tan \alpha\right)} \quad (9)$$

负荷均匀分布于主干线上的台区,理论上送容量为光伏集中于主干线末端情形的2倍。类似地,可以推导光伏逐渐增加、逐渐较少和中间较重分布情况下的接入容量。各种光伏分布下的最大接入容量和光伏集中于线路末端的最大接入容量之间的分布调整系数见表2。

表2 光伏接入分布系数

Tab. 2 Distribution coefficient of photovoltaic access

光伏分布情况	分布调整系数
末端集中	1
平均分布	2
逐渐增加	1.5
逐渐减少	3
中间较重分布	4

基于上述可接入容量的计算方法,考虑线路负荷均匀分布,分布式光伏集中接入在线路末端,电压上升最大值允许偏差为7%,即 $\Delta U=7\%$, U_N 分别调整线路参数以及供电半径数值,计算台区理论上送容量。常见型号的低压导线理论上送情况见表3。

表3 光伏集中线路末端时接入容量

Tab. 3 Connection capacity at the end of photovoltaic centralized lines (单位: kW)

供电半径	导线型号							
	LGJ-35	LGJ-50	LGJ-70	LGJ-95	LGJ-120	LGJ-150	LGJ-185	LGJ-35
0.2	219	278	378	481	562	673	749	219
0.3	146	185	252	321	375	449	500	146
0.4	110	139	189	241	281	337	375	110
0.5	88	111	151	192	225	269	300	88
0.6	73	93	126	160	187	224	250	73
0.7	63	79	108	137	161	192	214	63
0.8	55	69	94	120	141	168	187	55

计算某台区理论可开放容量时,先根据光伏接入分布查找分布调整系数,再根据台区供电半径和导线型号查找光伏集中于线路末端时的台区理论上送容量。分布调整系数乘以光伏集中于线路末端时的台区理论上送容量,台区理论上送容量与台区容量进行比对,满足安全性约束,确定台区最大上送容量。台区最大上送容量加上经过耦合分析的负荷即为该台区理论可开放容量。

2.4 配电变压器经济负荷分析

配电变压器综合损耗率公式为

$$\lambda(\eta) = \frac{P_0 + \eta^2 P_k}{\eta S_N \cos \varphi + P_0 + \eta^2 P_k} \times 100\% \quad (10)$$

式中, η 为损失率 λ 的负荷系数,称为有功经济负荷系数, $\eta=1$, 对应变压器经济运行区损耗率的临界值,而定义经济运行区的负荷系数下限为损耗率与额定运行情形相等时对应的负荷系数,如图3所示。

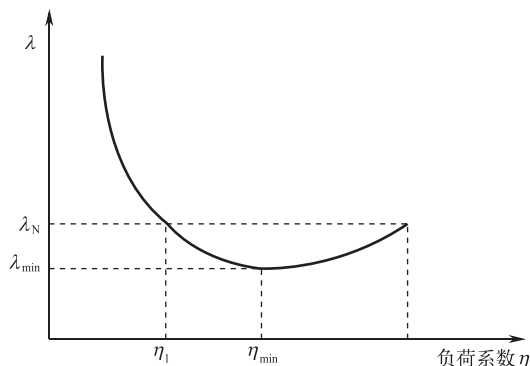


图3 变压器经济运行区

Fig. 3 Economic operation zone of transformers

经济运行区为 $(\eta_1, 1)$, 额定负荷工作时电源的损耗率为 λ_N , 临界负荷系数为 η_1 , 则有

$$\lambda_N = \frac{P_{OA} + P_{KA}}{P_{OA} + P_{KA} + S_N \cos \varphi} = \frac{P_{OA} + \eta_1^2 P_{KA}}{P_{OA} + \eta_1^2 P_{KA} + \eta_1 S_N \cos \varphi} \quad (11)$$

考虑变压器的损耗率一般在5%以内, 有 $S_N \cos \varphi \geq P_{OA} + P_{KA}$, $\eta S_N \cos \varphi \geq P_{OA} + \eta^2 P_{KA}$ ($0 < \eta < 1$), 对式(11)简化可求得临界负荷系数 η_1 为

$$\eta_1 = \frac{P_{OA}}{P_{KA}} = \eta_{\min}^2 \quad (12)$$

降低变压器损耗率的同时, 应保证变压器工作区间宽度不至于过窄, 国标规定了变压器的最佳工作区的负荷系数上限为0.75。可求得负荷率为0.75的变压器综合损耗率与最低损耗的关系以及变压器最佳运行区负荷系数的下限值 η_1 , $0.75 = 1.33 \eta_{\min}^2$ 。

由于光伏出力昼夜特征明显, 昼夜台区的负荷率变化区间较大, 为了适应台区的负荷波动, 因此选择较宽的经济运行区间, 可得出各类型号变压器经济运行区间。

光伏上送以后, 配电变压器作为升压变压器使用, 此时变压器损耗提升4%~5%, 线损也有所提升, 但变压器经济运行区间几乎不发生变化。

3 算例分析

选取某地区农村区域典型台区进行可开放容量测算, 验证测算流程及测算方法。台区基本情况见表4。

表4 台区基本情况

Tab. 4 Basic information of the station area

台区	配电变压器容量 / kV·A	2022年最大负荷 / kW	低压主干线导线型号	低压主干线长度 / m	供电用户数 / 户	工商业用户数 / 户	农村居民用户数 / 户
1号	200	60	LGJ-70	621	86	5	81
2号	100	71	LGJ-70	557	93	5	88
3号	200	76	LGJ-120	657	120	5	115
4号	200	76	LGJ-120	510	78	7	71
5号	100	73	LGJ-70	564	90	5	85

测算流程:

1) 查取负荷与光伏耦合系数。由于5个台区中, 工商业用户数均不到农村居民用户数的10%, 台区负荷特性以农村居民负荷特征为主, 所以农村居民负荷的耦合系数取0.71。

2) 台区负荷折算。将台区最大负荷乘以耦合系数, 折算至光伏最大出力时刻。台区负荷折算情况见表5。

表 5 台区负荷折算情况

Tab. 5 Load conversion of substation area

台区	配电变压器容量 /kV·A	2020 年最大负荷 /kW	耦合系数	折算后负荷 /kW
1 号	200	60	0.71	42.6
2 号	100	71	0.71	50.41
3 号	200	76	0.71	53.96
4 号	200	76	0.71	53.96
5 号	100	73	0.71	51.83

3) 电压约束下的开放容量测算。根据台区导线型号、供电半径查取理论光伏接入容量, 根据台区光伏分布查找光伏分布系数。本次计算功率因数选取0.9。台区负荷折算情况见表6。

表 6 电压约束下的开放容量测算

Tab. 6 Calculation of open capacity under voltage constraints

台区	理论光伏接入容量 /kW	光伏分布	分布系数	理论最大上送容量 /kW
1 号	123.02	末端集中	1	123.02
2 号	147.62	平均分布	2	295.24
3 号	177.56	逐渐增加	1.5	266.34
4 号	213.0	逐渐减少	3	639
5 号	147.62	中间较重分布	4	590.48

4) 校验安全性约束。根据台区配电变压器容量, 判定倒送功率是否会导致台区反向重载。台区安全性校验情况见表7。

表 7 台区安全性校验情况

Tab. 7 Security verification of station area

台区	折算后负荷 /kW	台区理论最大上送容量 /kW	是否超限	最大上送容量 /kW
1 号	42.6	123.02	否	123.02
2 号	50.41	295.24	是	80
3 号	53.96	266.34	是	160
4 号	53.96	639	是	60
5 号	51.83	590.48	是	80

5) 计算台区理论光伏可开放容量。根据台区最大上送容量和折算后的负荷, 计算台区理论光伏开放容量, 见表8。

表 8 台区理论光伏开放容量

Tab. 8 Theoretical photovoltaic open capacity of the substation area

台区	配电变压器容量 /kV·A	折算后负荷 /kW	最大上送容量 /kW	台区理论最大上送容量 /kW
1 号	200	42.6	123.02	165.62
2 号	100	50.41	80	130.41
3 号	200	53.96	160	213.96
4 号	200	53.96	160	213.96
5 号	100	51.83	80	131.83

6) 校验经济性约束。根据台区反送最大负荷率, 判断配电变压器处于经济运行区间, 得出最终的台区可开放容量, 见表9。

表 9 台区经济性校验

Tab. 9 Regional economic verification

台区	配电变压器型号	经济负荷区间	反向最大负荷率 (%)	是否满足校验	可开放容量 /kW
1 号	S11-200	(14, 100)	61.51	是	165.62
2 号	S11-100	(14, 100)	80	是	130.41
3 号	S13-200	(9, 100)	80	是	213.96
4 号	S13-200	(9, 100)	80	是	213.96
5 号	S13-100	(11, 100)	80	是	131.83

经过上述测算, 最终得到1~5号台区的光伏可开放容量。

4 结束语

本文基于光伏出力和配电网台区实际, 提出了一种台区分布式光伏可开放容量测算方法, 该方法包括光伏出力和台区负荷的耦合特性、台区电压约束、经济性约束和安全校验四个方面, 共6个指标系数, 得到一种保证台区安全稳定运行、同时最大限度消纳分布式光伏的可开放容量测算方法, 最后通过具体的算例分析进行验证。结论如下:

- 1) 提出7种不同负荷类型的典型台区负荷折算至光伏大发时刻的负荷耦合系数, 能较为准确地反映不同负荷特性的源荷耦合特性。
- 2) 综合考虑台区负荷率、电压质量和台区

运行效率,从台区安全校验、电压约束和经济性约束得到台区的分布式光伏可开放容量。

3) 实现了不同负荷类型台区在现有负荷下分布式光伏可开放容量的测算方法,可用于当前分布式光伏开发大热情况下的台区可开放容量测算,同时为10 kV线路和配电网可开放容量测算提供基础,有利于配电网升级改造和分布式光伏有序开发。

参考文献

- [1] 詹天津, 谢玉荣. 国内分布式光伏发展形势分析及思考[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 60-64.
- [2] 徐超, 叶婷. 支持整县屋顶分布式光伏发展的储能配置方案研究[J]. 电气时代, 2022(11): 103-106.
- [3] 赵冬梅, 任耀宇, 程雪婷. 低压配电网分布式光伏接纳能力分析[J]. 现代电力, 2021, 38(4): 392-401.
- [4] 魏欣荣, 吴俊勇, 丁然, 等. 基于光伏重心理论的配电网分布式光伏最大准入容量计算[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 1-3.
- [5] 梁志峰, 夏俊荣, 孙檬檬, 等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 9.
- [6] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会

约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 10.

- [7] 甘雯, 徐晴, 沈诚亮, 等. 基于鲁棒优化的配电网中分布式光伏准入容量研究[J]. 应用科技, 2019, 46(6): 53-62.
- [8] 张兴友, 陈涛, 赵帅, 等. 配电网分布式电源承载力评估指标体系构建及测算[J]. 山东电力技术, 2020, 47(11): 19-21.
- [9] BORGES R T, SALLES D, PEREIRA C O, et al. A comprehensive assessment of pv hosting capacity on low-voltage distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 99: 1.
- [10] 薛蕾, 井天军, 陈义, 等. 配电网光伏消纳能力定界模拟与消纳方案综合择优[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 907-916.
- [11] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 10.

作者简介

向加佳(1990—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事电力系统运行与控制教科研与教学工作。

(收稿日期: 2023-06-07)