变电站内新能源采集互联应用方案研究

王椿丰，胡曦文，卫银忠，王彬彬

（中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司，江苏 南京 211102）

摘要：传统变电站作为电力系统中电力输送和变换的载体之一，其功能较为单一。为充分利用可再生能源发电，降低站用电率，实现“零碳”变电站建设的目标，利用可再生分布式电源的变电站站用电系统是一个有价值的研究议题。以变电站为研究对象，充分发掘分布式能源可塑性强的特点，分析了变电站内可再生分布式能源的利用形式和接入方法；研究站用电微电网系统设计方案，主要包括系统架构设计、设备选型和配置原则，并结合变电站站内负荷提出多个新能源应用场景，对今后传统变电站向能源互联的综合能源站转型设计具有一定的借鉴意义和推广应用价值。

关键词：“零碳”变电站；可再生分布式电源；站用微电网系统；能源采集互联

Research on interconnection scheme of renewable energy in substation

WANG Chunfeng, HU Xiwen, WEI Yinzhong, WANG Binbin

(Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, China)

Abstract: As one of the carriers of power transmission and transformation in the power system, the traditional substation has a relatively single function. In order to make full use of renewable energy to generate electricity, reduce the rate of station power consumption, and achieve the goal of “zero-carbon” substation construction, the use of renewable distributed power substation station power system is a valuable research topic. Use the substation as the research object, fully explores the characteristics of the strong flexibility of distributed energy, analyzes the utilization form and access method of renewable distributed energy in the substation; the research station power microgrid system design scheme, mainly including system architecture design, the equipment selection and configuration principles, combined with the load in the substation station, propose multiple new energy application scenarios, which have certain reference significance and promotion application value for the future transformation of traditional substations to integrated energy stations with energy interconnection.

Key words: “zero-carbon” substation; renewable distributed power; station microgrid system; energy interconnection

0 引言

随着全球化石能源的不断消耗，开发和利用可再生、无污染的新能源已经迫在眉睫。风能和太阳能是目前应用最为广泛的两种可再生能源，且风电和光伏发电具有天然的互补性，同时储能技术可以有效地调节风光发电的互补性[1-5]。目前针对风光储能技术的研究主要集中在系统的优化配置、建模仿真、并网策略和微电网等方面[6-9]。传统变电站担负着电力系统中电能交换、汇聚和传送的作用，是电能传输和转换的重要枢纽，功能较为单一。考虑到电网中变电站数量多、布点广泛，具有很大的新能源开发利用潜在价值。

变电站站用电系统通常是指负责站内变压器的冷却系统用电、开关和刀闸分合动力用电、站内二次系统用电以及站内其他用电设施供电的电源及其辅助系统，是保证变电站安全可靠运行的关键。传统变电站站用电系统一般是通过本站低压母线或者其他变电站传输线经过降压变压器取电，变电站通过消耗电网侧的电能满足站内负荷消耗。变电站新能源采集系统的研究充分考虑利用可再生分布式电源的变电站站用电系统，充分利用可再生能源发电，降低站用电系统用电电量，减少电网侧能源的消耗，符合国家建设能源互联网的战略目标。

为充分挖掘变电站的富裕资源价值，本文以国家电网有限公司35～750 kV变电站通用设计中110 kV、220 kV及500 kV电压等级典型变电站为对象，研究变电站站内风光等新能源接入变电站站用电系统应用方案及应用场景，分析各应用场景下的储能配置策略，实现现有变电站及后续拟建变电站站内新能源采集互联方案，具有一定的参考价值。

1 系统介绍

1.1 系统框架

风光等分布式新能源接入变电站站用电系统，势必驱动系统架构由单一受电向实现分布式新能源友好并网改变。另一方面，接入站用电的分布式电源作为不可控源，其就地消纳问题和隔离方式同时制约着系统的供电可靠性。

针对上述变电站站用电系统的分布式电源并网问题，本文通过将储能系统[10-11]和分布式电源作为一个整体，提出风光储站用电微电网系统框架，如图1所示。

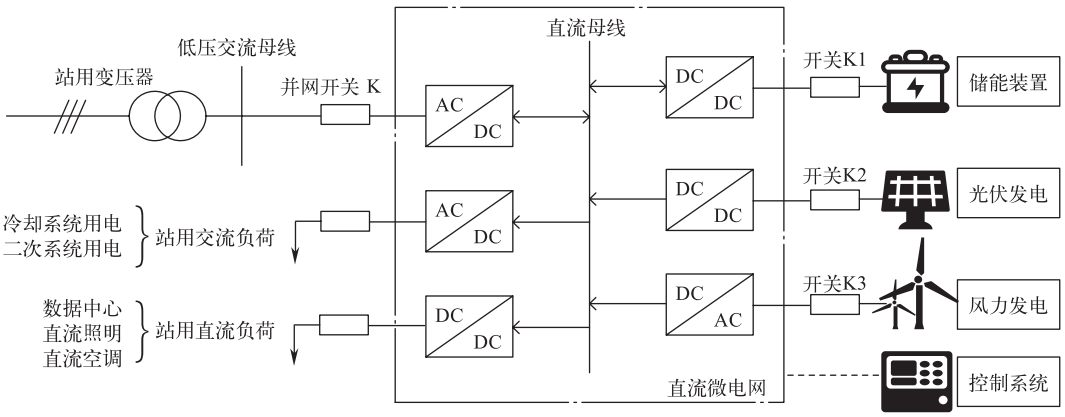

图 1 风光储站用电微电网系统的系统框架图

Fig. 1 System frame diagram of microgrid system for wind-solar storage station

站用电微电网系统由站用负荷、分布式风光电源、储能装置和控制系统组成，是一个用户侧电网，通过一个并网开关接入站用变压器低压交流母线，可进行并网运行与孤岛运行等模式的灵活切换[12-14]。在控制系统作用下，可实现站用交流负荷（冷却系统用电、二次系统用电）、站用直流负荷（数据中心、直流照明、直流空调、断路器控制保护）、分布式风光电源和储能装置的内部供需平衡，保证站用电系统的不间断供电。

该系统应用于变电站站内时具有以下典型优势。

（1）风光储一体化

变电站地面和屋顶存在大量待开发的空间，为风机和光伏组板的装设提供了便利条件，同时，合理地整合空间资源，也可充分利用风光资源在空间维度的互补性。

风光作为独立系统，在时间维度上具有以下特征：昼夜上，白天太阳能资源充足，而夜晚风能资源充足；季节上，春冬季节风能资源充足，而夏秋季节太阳能资源充足。风光资源的同时开

发利用，有助于实现风光资源在时间维度上的互补。

储能装置可吸收风光盈余能量，填补风光功率缺口，最大程度利用风光资源，保障负荷供电的平稳可靠。

（2）降低系统成本

风电和光电系统在储能装置、逆变器和控制保护系统是可以通用的，有助于降低风光互补发电系统的造价。基于负荷预测可实现孤岛运行模式下的微电网供需平衡，风光大发时可切换并网模式接入电网侧，具有较好的社会效益和较高的经济效益。

（3）通用的模块化设计

风光互补发电系统采用通用的储能装置、逆变器和控制保护系统，可进行模块化设计，造价低，性价比高，兼容性好，便于故障定位和日常检修。

站用微电网多电源馈入的系统架构会给用电系统的稳定性、电能质量以及控制保护等带来挑战，甚至对电网造成影响。为尽可能减少分布式电源接入给站用电系统带来的不利影响，合理选择接入方式和并网模式，根据电源的容量配置储能装置，同时实施必要的运行控制手段。

1.2 接入方式

如图2所示，将风光储系统引入到站用电系统中，和站用交直流负荷一起组成微电网系统，通过并网开关K和DC/AC变换器接入站用变压器低压侧交流母线。此种接入方式下，微电网将作为微电网内负荷的主要电源，负荷优先消耗微电网内风光等可再生能源，而本站主网电源作为站用电系统的备用电源，在微电网电能不足或者微电网故障时为负荷提供电能。

图 2 站用电系统接线示意图

Fig. 2 Diagram of station power system

在电网发生极端失电情况时，断开并网开关K，风光储微电网系统与电网侧解列，独立运行，实现不间断可靠供电，保证变电站的重要负荷不失电。当全站失电时，微电网可向电网侧反送电能，为变电站的黑启动提供动力。

1.3 并网方式

站用电微电网系统的并网模式一般采用交流并网和直流并网两种模式。

交流并网模式主要由分布式电源、储能系统、负荷和保护装置组成一个低压交流电网，再通过一个并网开关与变电站的主电网的低压380 V交流母线连接，如图3所示。风力发电系统通过AC/AC变换器接入微电网交流母线，光伏发电和储能装置通过DC/AC变换器接入微电网交流母线，风力发电和光伏发电的电能优先被站用电交流负荷使用，大大地提高了可再生能源的利用效率，相应地减少了站用电的损耗，多余电能通过储能装置储存起来，在风力发电和光伏发电不足时主要由储能装置供电。

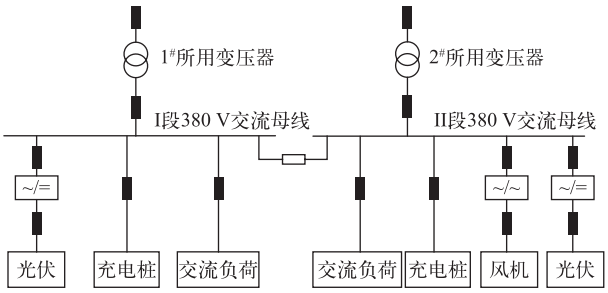

图 3 交流并网模式

Fig. 3 AC grid connection mode

直流并网模式下的站用电微电网系统属于直流微电网，可分成储能系统的直流部分、风光系统直流部分和直流负荷，两部分之间通过DC/DC变换器连接，电压等级为220 V直流电压。直流微电网系统通过DC/AC变换器接入380 V站用电交流母线。直流并网模式如图4所示。

风光系统包含光伏发电系统和风力发电系统。其中光伏发电系统采用光伏组件串联，经过汇流箱汇流到控制器，再通过DC/DC交换器接入站用直流母线；风力发电系统是交流风力发电机通过AC/DC交换器接入站用直流母线。风光系统

发出的电能优先转换为直流，且优先供变电站的直流负荷就近消耗，或通过DC/AC变换器供交流负荷使用多余的电能，经过DC/DC变换器传递给储能系统或供站内其他交流负荷使用。直流微电网系统通过DC/AC变换器和一个并网开关接入站用变压器380 V低压交流母线上。

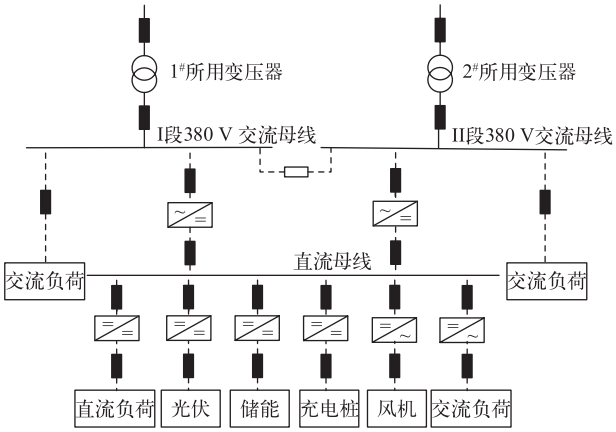

图 4　直流并网模式

Fig. 4 DC grid connection mode

考虑到站用电系统负荷分散性的特点，且大部分为交流负荷，如果采用直流并网模式会增加整流器环节，同时增加运维工作量，影响系统的可靠性，因此风光储站用电微电网系统多采用交流并网的接入方式。如果直流负荷比例较大，比如站内设置规模较大的数据中心，则直流配电将会有较大优势。直流配电网线损小，可靠性高，无须相频控制，接纳分布式电源能力强。故需根据直流负荷所占比重灵活选用不同并网方式。

1.4　控制模式

根据上述直流微电网的并网和接入方式特点，可设定孤岛运行、并网运行和传统运行三种控制模式。

（1）孤岛运行模式

孤岛运行模式下，分布式电源作为微电网唯一电源，独立为微电网内部负荷供电。并网模式下在主网发生失电时，断开并网联络开关K，微电网切换孤岛运行模式，储能单元作为微电网的平衡节点，维持系统稳定运行。

（2）并网运行模式

并网运行模式下，微电网内的电源系统和主网侧电源共同向站内交直流负荷供电。孤岛运行模式下，在与主网电压完成同步后，合上并网联络开关K，执行并网控制策略，恢复并网运行模式。

（3）传统运行模式

当检修或出现故障需要切断风光储系统与微电网的连接时，站内重要负荷应转换至由主网侧电源供电的传统运行模式。

上述三种运行模式可根据实际运行工况灵活切换，降低站内负荷的停电时间，减少变电站微电网系统的用电损耗，提高系统供电可靠性。

2　布置结构

2.1　光伏组件布置安装

光伏组件布置在变电站配电装置楼屋顶以及变电站围墙顶位置，如图5和图6所示。光伏组件所发直流经DC/DC变换器后，接至站内站用电220 V直流母线。

光伏组件通过钢支架固定于屋面和围墙顶部。光伏组件采用水平固定安装方式，安装倾角为10°，这种安装方式使用的支架系统简单，布置紧凑，对土建基础的承载要求不高。

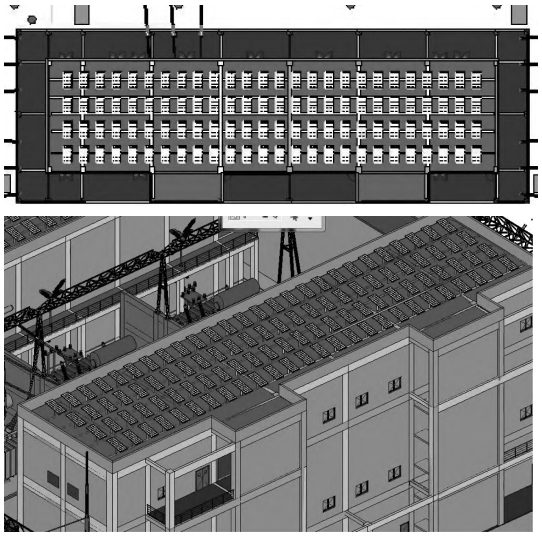

图 5　屋顶光伏布置示意图

Fig. 5 Sketch of roof photovoltaic layout

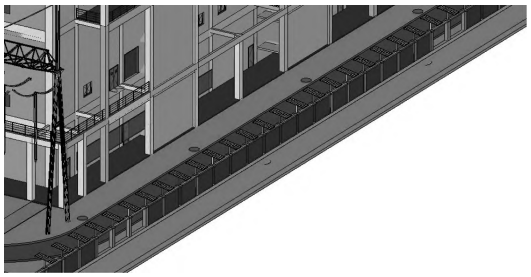

图 6　围墙光伏布置示意图

Fig. 6 Sketch of roof wall photovoltaic layout

2.2　风机组件布置安装

变电站内由于空间问题，不适合布置大型风机，因此选用发电功率在10 kW以下的小型水平轴风力发电机。由于变电站警卫室和消防泵房、雨淋阀室屋顶面积较小，不适宜布置光伏板，选择小型2 kW级水平轴风机，采用对角布置方式布置在变电站警卫室和消防泵房、雨淋阀室等小型建筑的屋顶，如图7所示。

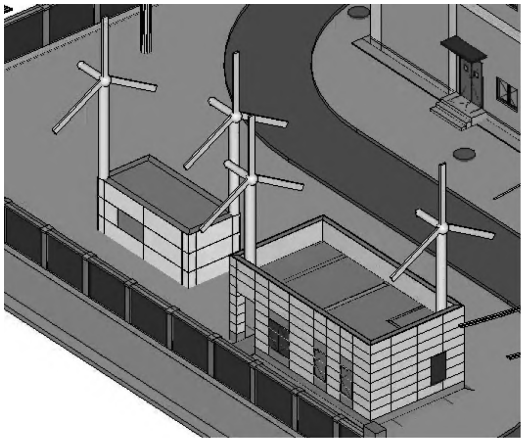

图 7　风机布置图

Fig. 7 Diagram of wind turbine layout

小型风机在建筑物楼顶一般布置于屋面梁与框架柱节点位置，风机自重及运行荷载直接通过框架梁柱传递，对安装风机的梁柱节点进行结构加强，经过计算后适当放大柱截面积，对结构的整体受力影响不大。

2.3　储能系统配置

储能系统由电池单元、电池管理系统和储能变流装置等组成。储能系统配置一套电池管理系统，用于整个系统内电池系统的数据处理和监测控制，同时实现与后台监控系统的通信。储能装置应结合变电站技术条件，根据交直流经常负荷统计和典型风电、光伏出力合理计算配置功率和容量，应满足以下条件

$$C_{\text{cell}} \geqslant \left(P_{\text{source}} - P_{\text{load}}\right) T_{\max} \tag{1}$$

$$P_{\text{cell}} \geqslant P_{\text{source}} \tag{2}$$

式中，C_{cell}为储能装置最大容量；P_{cell}为储能装置最大充电功率；P_{source}为可再生能源最大发电功率，包含风力发电和光伏发电的最大发电功率之和；P_{load}为日常站用交直流负荷功率；$T_{\max}$为新能源最大发电功率时长。

对于储能电池的选型方面，考虑到磷酸铁锂电池具备安全可靠、放电深度和充放电倍率高等优势，也是目前电化学储能中电网侧储能和用户侧储能主流采用的电池系统，是适合于变电站站内使用的电池类型，因此本文以磷酸铁锂电池作为分析和仿真对象。

3　能效分析

3.1　光伏系统发电量计算

并网光伏系统综合效率系数包括光照利用率、逆变器效率和集电线路损耗等，总效率大约为80%。

光伏组件年发电量计算式为

$$L = W \times H \times \eta \tag{3}$$

$$H = I_{\text{h}} / I_{\text{o}} \tag{4}$$

式中，L为光伏组件年发电总量；W为光伏组件的总装机容量；H为年峰值日照小时数；η为并网光伏系统综合效率系数；I_{h}为10°倾斜面下的年总太阳能辐射量（kW·h/m^2）；I_{o}为标准太阳辐射强度，取值1 000 W/m^2（电池组件标准测试条件）。

鉴于光伏发电量具有季节变化特性和可间断特性，选择一年中典型的春分、夏至、秋分和冬至四日，以通用设计方案220-A3-2为例，共计378块光伏组件，分别计算每日发电量作为当季度每日平均发电量。

为仿真需要，以拟建项目所在地江苏省南

京市为例进行分析。南京市地处东经111.8°、北纬32°，本工程的太阳能资源参考Meteonorm数据，根据式（3）、式（4）计算得出四个典型日发电量：春分3月21日为685.843 2 kW·h；夏至6月21日为947.116 8 kW·h；秋分9月22日为783.820 8 kW·h；冬至12月21日为555.206 4 kW·h。

3.2 风电系统发电量计算

小型风机暂按照每天8 h计算，效率大概为50%。以通用设计方案220-A3-2为例，在消防泵房及警卫室的屋顶对角布置4台风机，日发电量约为32 kW·h。

3.3 负荷预测

变电站负荷分为连续经常负荷与短时不连续负荷。连续经常负荷记为每日24 h均需供电负荷，白天不考虑照明，照明即为短时不连续负荷，站用负荷日均统计值计算式为

$$P_{\text{load}} = P_1 + P_2 + P_3 + 0.5P_4 \tag{5}$$

式中，P_1为直流经常负荷；P_2为交流经常动力负荷；P_3为交流经常加热负荷；P_4为短时照明负荷。

变电站固定年耗能通过站用负荷日均统计值乘以变电站年运行时间获得。

3.4 节电分析

由于新能源输出的间断性与波动性，可能会造成弃风、弃光的问题出现，弃风、弃光问题发生在变电站系统中的主要原因是电力负荷需求侧管理成效不明显，新能源出力无法被及时消纳，但通过储能系统的配置和调节，有效地解决了弃风、弃光的问题。因此在变电站新能源系统中，优化问题变为如何高效利用新能源出力。

若变电站固定消耗能量始终大于新能源发出能量，则新能源输出可做到随发随用，不存在弃风、弃光的问题，新能源发电得到最大利用率。若在正午新能源大发时，变电站固定耗能量不足以完全消纳新能源输出，则可以按需要配置储能单元，通过合理控制、调度储能系统，使得新能源接入站用电系统在任意场景均能做到满发尽用，做到不弃风、不弃光，高效利用新能源输出以减少站用电的消耗，降低输变电损耗。

4 实例

本节以国家电网有限公司通用设计方案为依托，分别以500-A1-3（全户外）、220-A2-2（全户内）、220-A3-2（半户内）和110-A2-6（全户内）四个方案为载体，工程建设地点以江苏省南京市为例，对此进行风光发电计算研究与分析。通过式（1）～式（5）的计算可得四个应用场景下的主要参数见下表。

表 各方案理论发电值及能耗估算

Tab. Theoretical power generation estimation and energy consumption table of each scheme

场景	500-A1-3	220-A2-2	220-A3-2	110-A2-6
交直流负荷 / kW	690	173	153	100
日固定耗能 (kW/kW·h)	635/15 240	173/4 152	192/4 600	100/2 400
光伏容量 /kW	228	471	204	177
风电机容量 / kW	16	8	8	8
日发电量（kW/kW·h）	229/1 060	471/2 185	204/947	177/821
储能配置（kW/kW·h）	-	500/1 600	250/600	200/400

500-A1-3场景：新能源每日高峰发电量远小于常用负荷消耗能量，从节约投资角度考虑，建议不配置储能装置，在白天风光满发及夜晚没有光伏的情况下，所有新能源发电量均能被站用负荷实时消纳，做到满发尽用，不存在弃风、弃光的问题。

在220-A2-2、220-A3-2和110-A2-6三个应用场景下，新能源每日高峰发电量大于变电站每日常用负荷。通过合理配置储能装置，保证新能源在夜晚没有光伏的情况下，发电量可被站用负荷实时消纳，但在白天新能源大发期间，需要通过合理配置、调度储能系统，存储新能源大发时的结余能量，实现绝大多数新能源结余能量被有效存储并且调节负荷曲线的功能。

对以上四种场景的适应性分析可看出，对于500 kV方案，新能源采集的电量估算最大值远小

于变电站站用负荷，新能源采集的电能可以被变电站内负荷及时消纳，风光产生的电能不需要存储，即发即用；对其余三个方案，通过合理配置储能，可以实现新能源的全部利用。

5 结束语

本文提供了一种变电站站内新能源采集互联系统设计方案，提出由站内风光系统、储能、控制系统和站用电负荷组成的微电网系统及并网模式。基于国家电网有限公司通用设计的典型方案，分析了110～500 kV电压等级下典型设计方案中的光伏、风机布置以及储能的配置方式，在不改变通用设计方案的前提下，研究了新能源采集互联后的变电站站用电系统，基于微电网网架结构，接入新能源后的站用电系统具有灵活调度的能力，对不同场景都具有优秀的适应性，有效地降低了站用电率，实现了节能降耗的目标。

参考文献

[1] 徐荥，施红，陈政．风光储能技术在变电站应用研究[J]．可再生能源，2013，31(9)：115-117．

[2] 施世鸿，郭芳．光伏发电在500 kV变电站的应用及影响[J]．中国电力，2014，47(12)：105-109．

[3] 黄河，高松，韩俊，等．交直流混合配电网分布式电源最大准入容量[J]．电力建设，2019，40(10)：75-83．

[4] 段江曼，吴云来，朱亦杰．园区级风光储充多能互补设计方案的应用[J]．太阳能，2020(4)：71-78．

[5] 杨朝翔，李红建，陈蕾，等．光伏发电直流接入与消纳的方案设计和工程实践[J]．中国电力，2019，52(10)：108-114．

[6] 许佳佳，张敏，是晨光．基于交直流混合微网的智能变电站新型站用电系统[J]．智慧电力，2018，46(7)：14-18．

[7] 牛涛，查申森，钱康，等．变电站站用电系统中的微电网应用[J]．电力建设，2015，36(8)：108-113．

[8] 杨昆，周晓健，夏能弘，等．考虑微电网接入下的配电网优化规划[J]．电测与仪表，2019，56(2)：52-69．

[9] 李鹏，张雪松，赵波，等．多微网多并网点结构微网设计和模式切换控制策略[J]．电力系统自动化，2015，39(9)：172-178．

[10] 马会萌，李相俊，贾学翠．多站融合场景下的系统配置及协调运行策略[J]．电力建设，2021，42(1)：96-104．

[11] 曹凌捷．光储充一体化电站建设关键技术研究[J]．电力与能源，2017，38(6)：746-749．

[12] 金成生，刘稳坚，邱尚青．微电网技术在上海迪士尼110 kV智慧变电站中的应用[J]．华东电力，2014，42(5)：1027-1030．

[13] 陈杰，陈新，冯志阳，等．微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J]．中国电机工程学报，2014，34(19)：3089-3097．

[14] 韩俊，袁栋，谢珍建，等．交直流配电网典型形态特征对比与应用模式[J]．电力建设，2020，41(3)：93-99．

作者简介

王椿丰（1986—），男，硕士，高级工程师，研究方向为输变电工程设计。

胡曦文（1995—），女，硕士，工程师，研究方向为输变电工程电力系统稳定与控制。

卫银忠（1969—），男，硕士，教授级高级工程师，研究方向为输变电工程设计。

王彬彬（1987—），女，硕士，高级工程师，研究方向为输变电工程设计。

（收稿日期：2023-10-13）