风-光-水多能互补发电系统烟分析模型

么艳香',叶林',屈晓旭',王伟胜2,李 湃2,董 凌3 (1. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083;2. 中国电力科学研究院有限公司,北京 100192; 3. 国网青海省电力有限公司电力科学研究院,青海 西宁 810008)

摘要:将烟的概念引入风、光、水等多种异质能源资源的同质化表征,采用烟分析方法建立有效的风力发电、 光伏发电和水力发电系统的佣分析模型。基于佣分析模型,计算各发电系统的输入㶲值和输出㶲值,同时, 建立风-光-水多能互补发电系统(MEGPS)总㶲效率、可持续性指数和单位㶲损失比等能效分析指标,对风-光-水MEGPS进行能效分析。通过算例分析,验证了所提烟分析模型的正确性和能效指标的适用性。所提 出的方法为提高MEGPS利用效率提供了科学依据。

中图分类号:TM 61;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908035

0 引言

基于风、光、水等多种异质能源的物理特性和风 力发电、光伏发电、水力发电等发电系统的出力特 性,构成多种异质能源耦合并网的发电系统,可以有 效平抑风力发电和光伏发电出力的波动性[14]。同 时,对于提高整个电力系统的能源利用率和电网稳 定性具有一定意义[5-7]。

目前,针对风、光、水等多种异质能源互补发电 系统的研究主要侧重于容量规划、优化调度和系统 评估3个方面。文献[8]提出基于时序生产模拟的 风力发电和光伏发电并网容量配比优化方法,利用 风电和光伏的互补作用以及抽蓄电站的调节作用得 到最优的风电、光伏接入容量配比,充分利用不同类 型电源的互补作用,实现大规模新能源的平稳送出 和消纳。文献[9]充分利用风、光、水等资源之间的 互补特性,以可靠性、经济效益和可再生能源消纳为 目标,提出了风电、光伏、水电、火电等互补发电系统 日前优化调度模型。文献[10]综合评估了风、光、 柴、储互补发电系统的可靠性与经济性,为风、光互 补发电系统的规划与设计提供参考。然而,风、光、 水等多种异质能源互补发电系统中风、光、水等资源 具有质的差异性,因而对风、光、水等多种异质能源 的同质化表征和多能互补发电系统 MEGPS(Multi-Energy Generation Power System)模型的建立与分 析,成为研究MEGPS的关键课题。

当前对于异质能源多应用"能量"进行统一表 征,如风的动能、太阳能、水的势能等。同时,应用

收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-07-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902200);国家 电网公司科技项目(5228001700CW)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902200) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5228001700CW)

"能量效率"来评价异质能源在数量上的多少。然 而,能量在转换时具有量的守恒性和质的差异 性[11-12],应该从"量"与"质"的结合上正确评价能的 价值。因而,需要一个既能评价能量的"量",又能评 价能量的"质"的物理量来表征异质能源。因此,将 佣的概念应用到异质能源分析,实现异质能源"量" 与"质"的统一表征。

烟概念和 佣分析方法不仅在工程热力学得到 广泛应用,还被扩展应用于 MEGPS 中,以分析多种 能量的品位。文献[13]利用烟和烟分析方法对风 电、光伏发电和地热发电等可再生能源系统进行分 析,对各发电系统不同环节的㶲损失进行定性和定 量的评估。文献[14]对各种可再生能源发电系统的 佣分析和效能评估进行了综述, 佣分析方法为可再 生能源发电系统提供了一种有用的分析工具,为可 再生能源资源的效能分析、仿真和性能评价提供了 参考价值。综合能源系统的效率分析主要有能量分 析法和佣分析法2种方法,文献[15]分别采用能量 分析法和佣分析法对综合能源系统在不同死态温度 值下进行分析,不同的死态温度值下综合能源系统 的能效率和㶲效率呈现不同的变化。文献[16]采用 佣分析方法对离网型风力发电、光伏发电、抽水储 能、氢储能等混合能源发电系统进行热力学评估。 文献[17]对各种典型的太阳能应用系统能量分析和 佣分析进行综述,由于能量分析法基于热力学第一 定律分析能量数量关系和能量效率,而佣分析法是 在热力学第一定律和第二定律的基础上分析能量数 量和品质的变化情况, 佣分析法为评价系统利用效 率提供较为有效的方法。

然而,上述文献分析的对象大多是各发电系统 的各个组成环节,对于宏观的发电场能效评估尚未 涉及。同时,现有的研究对 MEGPS 的 佣分析模型 描 述不够详尽,对MEGPS的能效评估没有系统的指标 体系,且较少对水力发电系统进行佣分析。

本文将烟的概念引入风、光、水多种异质能源资源的同质化表征,采用烟分析方法分别对风-光-水 MEGPS进行能效分析。建立各发电系统烟分析模型,基于烟分析模型建立 MEGPS能效分析指标,进 而对 MEGPS进行能效评估。将烟理论和烟分析方 法应用于风力发电、光伏发电和水力发电等 MEGPS 中,对 MEGPS能源利用效率的提高将具有重要的指 导意义。

1.1 烟的概念

畑是指系统由任意状态可逆变化到与给定环 境相平衡的状态时,理论上可以无限转换为任何其 他形式能量的那部分能量,即系统中的可用能^[11,18]。 畑随着热力学第二定律而不断发展:最早在1824 年,法国工程师Carnot建立了热力学第二定律的基 础;1868年Tait第一次使用了能量的"availability"确 定了热量中的有效部分和无效部分;随后,经过 Maxwell、Gibbs、Stodola等人的推进研究,到1953年, Rant提出采用术语"exergy"替代"availability"和 "available energy"等概念,得到了国际公认。1957 年,南京工学院动力系将"exergy"译为"畑"^[19]。

包含风力发电、光伏发电、水力发电的 MEGPS 利用风、光、水等资源的物理特性,将各种异质能源 资源所蕴含的能量如风的动能、太阳能、水的势能 等,转化为同一种能量——电能。为了统一表征各 异质能源,用烟来描述各异质能源资源所蕴含的能 量中的有用的部分,即风能烟、太阳能烟、水能烟等, 从而在发电系统资源输入端实现异质能源可用能量 的统一表征。

1.2 烟效率

一种能量烟转换为另外一种能量烟的过程中必

然存在不可弥补的损失,这部分损失称为烟损失。 烟损失可以表明实际转换过程的不可逆程度,故其 大小可以衡量能量转换过程的完善程度^[21]。

图1为某一能量转换系统简易模型,该系统将 一种能量烟(记为输入烟,其值为*E*^x_{in})转换成另一种 能量烟(记为输出烟,其值为*E*^x_{on})。

$$E_{in}^x$$
 系统 E_{out}^x

图1 能量转换模型

Fig.1 Model of energy conversion

图1中能量转换模型应满足烟平衡等式,即:

$$\sum E_{\rm loss}^{\rm x} = \sum E_{\rm in}^{\rm x} - \sum E_{\rm out}^{\rm x} \tag{1}$$

其中, E_{loss}为系统的不可逆拥损失。

畑损失是一个绝对量,常结合畑效率来揭示能量转换、能量利用和能量损耗的实质,反映实际过程 偏离理想过程的程度^[22]。系统的畑效率为:

$$\psi = \frac{\sum E_{\text{out}}^x}{\sum E_{\text{in}}^x} \tag{2}$$

1.3 佣分析法

综合能源系统的能效分析主要采用能量分析法 和, 和, 本有法, 这两者的区别是^[23-24]:能量分 析法基于热力学第一定律定量分析能量转化的数量 关系和能量利用的效率, 往往只是考虑了能量数量 的平衡, 而忽略了能量质量的不同, 其不能揭示因不 可逆过程造成的能量贬值问题, 也不适用于不同品 位能源同时存在的综合能源系统; 佣分析法在热力 学第一定律和第二定律的基础上将能量的"量"与 "质"有机结合起来, 定性分析能量数量和品质的变 化情况, 能够更深刻揭示能量的传递和转化过程中 能量质量退化的本质。 佣分析法比能量分析法更科 学、更深入且更全面。 因此, 在评价能源利用程度和 节能潜力评估等方面采用佣分析法都能提供出更为 科学的指导意义。

2 MEGPS 烟分析模型

2.1 风力发电系统

风力发电系统将风能烟转换为电能烟,风力发 电系统烟平衡等式为^[25]:

$$\Delta E_{\text{air,w}}^{x} = E_{e,w}^{x} + E_{\text{loss,w}}^{x}$$
(3)

其中, $\Delta E_{air,w}^x$ 为风电场输入净风能 $\#^{[15]}$,由式(4)进行计算; $E_{e,w}^x$ 为风电场输出电能 $\#;E_{bos,w}^x$ 为风电场#损失。

$$\Delta E_{\rm air,w}^{\rm x} = E_{\rm air,in,w}^{\rm x} - E_{\rm air,out,w}^{\rm x}$$
(4)

其中, $E_{air,in,w}^{x}$ 为风电场输入风能烟,如式(5)所示; $E_{air,ont,w}^{x}$ 为风电场输出风能烟,如式(6)所示。

$$E_{\text{air,in,w}}^{x} = \frac{1}{2} \rho_{a} A_{w} v_{\text{in}}^{3} t \qquad (5)$$

$$E_{\rm air,out,w}^{\rm x} = \frac{1}{2} \rho_{\rm a} A_{\rm w} v_{\rm out}^{\rm 3} t \tag{6}$$

其中, ρ_a 为空气密度; A_w 为扫风面积; v_{in} 为风电场的等效切入风速; v_{out} 为风电场的等效切出风速;t为时间。

风电场输出的电能畑,即风电场输出的电能。 其计算方法详见文献[26]。

风电系统的烟效率为:

$$\psi_{\rm w} = \frac{E_{\rm e,w}^{\rm x}}{\Delta E_{\rm air,w}^{\rm x}} \tag{7}$$

2.2 光伏发电系统

光伏发电系统将太阳能畑转换为电能畑,光伏 发电系统畑平衡等式为:

$$E_{\text{in,pv}}^{x} = E_{e,pv}^{x} + E_{\text{loss,h}}^{x} + E_{\text{loss,op}}^{x}$$
(8)

其中, $E_{in,pv}^{x}$ 为光伏发电系统输入的太阳能烟,由式 (9)进行计算^[17]; $E_{e,pv}^{x}$ 为光伏发电系统输出的电能烟; $E_{loss,h}^{x}$ 为光伏发电系统热损失烟; $E_{loss,op}^{x}$ 为光伏板和覆 盖玻璃吸收和反射的光损失烟^[27]。

$$E_{in,pv}^{x} = GA_{s}t \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_{a} + 273}{T_{s}} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{a} + 273}{T_{s}} \right)^{4} \right] \quad (9)$$

其中,G为光照强度; A_s 为面积; T_a 为环境温度; T_s 为太阳表面温度,一般为5600 K。

光伏发电场输出的电能畑,也即光伏发电场输 出的电能。其计算方法详见文献[28]。

光伏发电系统的烟效率计算为:

$$\psi_{\rm pv} = \frac{E_{\rm e,pv}^{\rm x}}{E_{\rm in,pv}^{\rm x}} \tag{10}$$

2.3 水力发电系统

水力发电系统将水能烟转换为电能烟,水资源 所蕴含的烟主要为动能烟^[29]、热力学烟以及压力 烟^[30],水力发电系统烟平衡等式为:

$$E_{\text{in,water}}^{x} = E_{\text{e,water}}^{x} + E_{\text{loss,sur}}^{x} + E_{\text{water,pr}}^{x}$$
(11)

其中, $E_{in,water}^{x}$ 为水力发电系统输入的水能畑; $E_{e,water}^{x}$ 为水力发电系统输出的水能畑; $E_{loss,sur}^{x}$ 为水轮机与环境之间热交换的热畑; $E_{water,pr}^{x}$ 为压力畑。

$$E_{\rm e,water}^{\rm x} = \eta_{\rm water,ge} \eta_{\rm water,tu} h \rho_{\rm water} gqt \qquad (12)$$

其中,h为水头高度; ρ_{water} 为水的密度;g为重力加速度;q为水流量; $\eta_{water,ge}$ 为水力发电机的效率; $\eta_{water,tu}$ 为水轮机的效率。

水力发电系统中烟效率计算为:

$$\psi_{\text{water}} = \frac{E_{\text{e,water}}^{\text{x}}}{E_{\text{in water}}^{\text{x}}} \tag{13}$$

3 MEGPS能效分析指标

在考察周期内,采用烟分析方法对风-光-水

MEGPS进行能效分析,建立能效分析指标体系,为提高能源利用效率提供科学依据。

3.1 系统总效率

发电系统中, /// 效率反映对输入// // 的利用程度。 考察周期内, 风力发电、光伏发电、水力发电的// // 效 率计算为:

$$\psi_{i} = \sum_{t=1}^{T} E_{\text{out},i,t}^{x} / \sum_{t=1}^{T} E_{\text{in},i,t}^{x}$$
(14)

其中,T为时间周期; $E^{x}_{int,i,t}$ 和 $E^{x}_{in,i,t}$ 分别为i类发电系统t时刻的输出烟和输入烟。

MEGPS 总效率为:

$$\psi_{\text{total}} = \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} E_{\text{out},i,t}^{x} / \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} E_{\text{in},i,t}^{x}$$
(15)

其中,N为发电系统总数。

3.2 可持续性指数

本文提出可持续性指数来衡量给定能源系统的 /用效率,可持续性指数表明///效率如何影响资源或 系统的可持续性。发电系统的可持续性指数为:

$$S_i = \frac{1}{1 - \psi_i} \tag{16}$$

佣分析为提高系统性能提供了依据,可持续性 指数为现有系统的改进提供的范围依据,从而使效 益最大化。可持续性指数越高,则发电系统可持续 能力越好。

3.3 单位畑损失比

MEGPS中对于容量等级相差较大的发电系统, 各发电系统的畑损失率并不能准确地反映各发电系 统的畑损失与总系统畑损失的关系。因此,采用发 电系统的单位畑损比评估各发电系统畑损失。定义 发电系统的畑损失率与总畑损失率的比值为该发电 系统的畑损失比,即:

$$\omega_{i} = \frac{\sum_{t=1}^{T} E_{\text{loss},i,t}^{x}}{\sum_{t=1}^{T} E_{\text{in},i,t}^{x}} / \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} E_{\text{loss},\text{total}}^{x}}{\sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} E_{\text{in},\text{total}}^{x}}$$
(17)

其中, $E_{\text{loss,total}}^x$ 为系统总的畑损失; $E_{\text{in,total}}^x$ 为系统总的输入畑。

则各发电系统的单位畑损失比为:

$$Z_i = \omega_i / \sum_{i=1}^{N} \omega_i \tag{18}$$

4 算例分析

以我国西北某省为例,对2017年7月1日至 2017年7月31日的风-光-水互补发电场中各发电 场和互补发电场的输出电能进行计算,并结合历史 数据,对各发电场和互补发电场的能量利用效率进 行评估。其中,风、光、水各发电场站额定容量分别为100、20、1280 MW。

考察周期内风速、光照强度、环境温度和水流量 如图2所示。根据本文所提计算方法,分别计算风 电场输入风能烟、光伏电站输入太能烟和水电站的 输入水能畑,同时与采用传统的能量计算方法^[15]得 到的各发电厂输入能进行对比,如附录中图A1 所示。



Fig.2 Input variables of MEGPS

风-光-水 MEGPS运行中需要满足功率平衡、各 发电系统出力、供电可靠性等约束条件,在建立各发 电系统畑分析模型时,假设风-光-水多能互补运行 满足上述约束条件。

根据佣分析模型,计算各发电系统输出的电能 ,并和实际发电场输出电能,进行比较,以验证模 型的正确性。需要说明的是,各发电场实际输出的 均是电能,这是由于电能是"高级能量",其能级系数 为1^[11]。因此,将电能直接转换为电能,与模型输 出电能,进行对比。

图3展示了典型日内风力发电、光伏发电和水 力发电各发电场实际输出电能///与本文所建模型输 出电能///。通过图3中输出值与实际值的对比可 知,各发电场的///模型输出的电能///和实际电能/// 波动基本一致,因此,验证了本文所建立的///分析模 型的正确性。本文未考虑故障检修、弃风、弃光等情 况,因此模型输出结果比实际结果偏大。

结合风力发电场、光伏发电场和水力发电站的 实际输出电能畑,计算各发电场站的实际烟效率和 能效率。考察周期内各发电系统的实际输出电能的 能效率和烟效率如图4所示。由图4可知,各发电系





统的烟效率高于其对应的能效率,这充分说明烟分 析法将能量的"量"与"质"有机结合起来,能够更深 刻揭示能量的传递和转化过程中能量质量退化的本 质。由于水力发电系统的额定容量较大,且水力发 电系统的效率较高,整个计算周期内的 MEGPS 实际 能效率为0.78,烟效率为0.85,均高于风力发电系统 和光伏系统的能效率和烟效率。可见,风-光-水 MEGPS 的能源利用效率均高于风电、光伏单独发电 系统的能源利用效率。

根据可持续性指数计算方法,计算采样周期内 各发电系统的可持续性指数,可得风电、光伏、水电 和总系统的可持续性指数分别为1.75、1.13、9.68 和 6.88。可持续性指数较好地反映了发电系统的烟效 率:光伏发电系统电能转换效率低,其烟效率相对较 低,因此,光伏发电系统的可持续性最差;水力发电 机的效率较高,其烟效率较高,因此,水电系统的可 持续性较好。MEGPS综合了风力发电、光伏发电和 水力发电,其可持续性指数较风力发电系统和光伏 发电系统的可持续性指数均有较大提高。

计算各发电系统的单位///损失比,风、光、水各 发电系统的单位///损失比分别为42.79%、50.49% 和6.73%。在MEGPS中,光伏发电系统的///损失占 比最高,表明风-光-水 MEGPS中每单位///损失中, 有50.49%的///损失来自光伏发电系统。该分析结 果为提高风-光-水 MEGPS的效率提供了科学依据。

基于佣分析模型对风-光-水 MEGPS总烟效率、 可持续性指数和单位佣损失比进行评估,为提高 MEGPS利用效率提供了理论指导。

5 结论

本文将烟的概念引入风、光、水多种异质能源资源的同质化表征,建立风力发电、光伏发电和水力发电 MEGPS 烟分析模型,并构建 MEGPS 能效分析指标,对 MEGPS 进行能效分析,最后通过算例验证烟分析模型的正确性和烟分析方法的适用性。通过研究,主要结论如下:

(1) 畑分析模型可以正确反映风-光-水 MEGPS 的输出电能情况;

(2) 畑分析法将能量的"量"与"质"有机结合起 来,能够更深刻揭示能量的传递和转化过程中能量 质量退化的本质;

(3) / 州效率反映对输入/ 州的利用程度, 风-光-水 MEGPS 的/ 州效率高于单独的风力发电、光伏发电 系统的/ 州效率;

(4)可持续性指数较好地反映了发电系统的烟 效率,为现有系统的改进提供了范围依据,MEGPS 综合了风力发电、光伏发电和水力发电,其可持续性 指数较风电系统和光伏系统均有所提高。

风、光、水等 MEGPS 有效的能效分析方法和分 析模型可为提高 MEGPS 的效率提供科学依据和理 论指导,同时,也为分析综合能源电力系统的协调控 制、优化调度奠定了模型基础。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1]夏永洪,吴虹剑,辛建波,等.考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J].电力自动化设备,2017,37
 (7):63-69.

XIA Yonghong, WU Hongjian, XIN Jianbo, et al. Evaluation of economic operation for microgrid with complementary DGs and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7):63-69.

- [2] 程林,张靖,黄仁乐,等.基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
 CHENG Lin,ZHANG Jing,HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):282-287.
- [3] 李升,卫志农,孙国强,等. 大规模光伏发电并网系统电压稳定

分岔研究[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):17-23.

LI Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Voltage stability bifurcation of large-scale grid-connected PV system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1):17-23.

- [4] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究
 [J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
 JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Research on some key problems related to integrated energy systems
 [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.
- [5] 王瑾然,卫志农,张勇,等. 计及不确定性的区域综合能源系统 日前多目标优化调度[J]. 电网技术,2018,42(11):3496-3506.
 WANG Jinran,WEI Zhinong,ZHANG Yong, et al. Multi-objective optional day-ahead dispatching for regional integrated energy system considering uncertainty[J]. Power System Technology,2018,42(11):3496-3506.
- [6] 叶林,屈晓旭,么艳香,等.风光水多能互补发电系统日内时间 尺度运行特性分析[J].电力系统自动化,2018,42(4): 158-164.
 YE Lin, QU Xiaoxu, YAO Yanxiang, et al. Analysis on intra-

day operation characteristics of hybrid wind-solar-hydro power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(4):158-164.

 [7] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合 能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36 (12):3292-3305.
 WANG Weiliang,WANG Dan,JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy sys-

steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(12):3292-3305.

- [8] 李湃,黄越辉,王跃峰,等.含抽蓄电站的多端柔性直流电网风 光接入容量配比优化方法[J].中国电力,2019,52(4):32-40.
 LI Pai,HUANG Yuehui,WANG Yuefeng, et al. Optimization of wind and solar power capacity proportion integrated in multiterminal VSC-HVDC system with a pumped storage power station[J]. Electric Power,2019,52(4):32-40.
- [9] FU Yiwei, LU Zongxiang, HU Wei, et al. Research on joint optimal dispatching method for hybrid power system considering system security[J]. Applied Energy, 2019, 238:147-163.
- [10] 王凯,栗文义,李龙,等. 含风/光互补发电系统可靠性与经济 性评估[J]. 电工电能新技术,2015,34(6):52-56.
 WANG Kai,LI Wenyi,LI Long, et al. Reliability and economy evaluation of complementary power systems containing wind and solar energy[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2015,34(6):52-56.
- [11] 朱明善. 能量系统的烟分析[M]. 北京:清华大学出版社, 1988:5-10.
- [12] 杨东华. 畑分析和能级分析[M]. 北京:科学出版社,1986: 14-15.
- [13] KORONEOS C, THOMAS S, NIKOLAOS M. Exergy analysis of renewable energy sources[J]. Renewable Energy, 2003, 28(2): 295-310.
- [14] ARIF H. A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 12(3):593-661.
- [15] HAKAN C,IBRAHIM D,ARIF H. Energy, exergy and sustainability analyses of hybrid renewable energy based hydrogen and electricity production and storage systems: modeling and case study[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 61 (2): 784-798.
- [16] PETRAKOPOULOU F, ROBINSON A, LOIZIDOU M. Exergetic analysis and dynamic simulation of a solar-wind power plant

with electricity storage and hydrogen generation [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113:450-458.

- [17] SANSANIWAL S K,SHARMA V,MATHUR J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: a comprehensive review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82:1576-1601.

WANG Jiaxuan. Status quo and development of exergy analysis [J]. Journal of North China Institute of Electric Power, 1991(1):45-50.

 [19] 蒋爱华. 泛畑分析方法及其应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
 JIANG Aihua. Study on universal exergy analysis method

and its application [D]. Changsha: Central South University, 2011.

- [20] YOLANDA L, FONTINA P, TATIANA M, et al. An exergy-based study on the relationship between costs and environmental impacts in power plants[J]. Energy, 2017, 138:920-928.
- [21] 何青,刘辉,刘文毅.风电-压缩空气储能系统/#和/#成本分析 模型[J]. 热力发电,2016,45(2):34-39.
 HE Qing,LIU Hui,LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model for wind-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation,2016,45(2):34-39.
- [22] COSTA V A F. On the exergy balance equation and the exergy destruction[J]. Energy, 2016, 116:824-835.
- [23] YOUSEF M S, HASSAN H, SEKIGUCHID H. Energy, Exergy, Economic and Enviroeconomic (4E) analyses of solar distillation system using different absorbing materials [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 150: 30-41.
- [24] KHOSRAVI A, KOURY R N N, MACHADO L, et al. Energy, exergy and economic analysis of a hybrid renewable energy with hydrogen storage system[J]. Energy, 2018, 148:1087-1102.
- [25] AGHBASHLO M,TABATABAEI M,HOSSEINI S S,et al. Performance assessment of a wind power plant using standard exergy and Extended Exergy Accounting (EEA) approaches

[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171:127-136.

- [26] ZHAO Yongning, YE Lin, WANG Weisheng, et al. Data-driven correction approach to refine power curve of wind farm under wind curtailment[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(1):95-105.
- [27] LI Dianhong, XUAN Yimin, LI Qiang, et al. Exergy and energy analysis of photovoltaic-thermoelectric hybrid systems[J]. Energy, 2017, 126: 343-351.
- [28] BETT P E, THORNTON H E. The climatological relationships between wind and solar energy supply in Britain [J]. Renewable Energy, 2015, 87(1):96-110.
- [29] CHEN B, CHEN G Q, HAO F H, et al. Exergy-based water resource allocation of the mainstream Yellow River[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2009, 14(4):1721-1728.
- [30] 王继选,刘小贞,霍娟,等. 广义计算模型及其在发电系统中的 应用[J]. 太阳能学报,2016,37(5):1255-1261.
 - WANG Jixuan, LIU Xiaozhen, HUO Juan, et al. The calculation model of generalized exergy and its application in generation system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1255-1261.

作者简介:



么艳香(1984—),女,山东聊城人,博 士研究生,主要研究方向为电力系统自动 化、新能源发电技术等(E-mail:yyxiang@cau. edu.cn);

叶 林(1968—),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、新能源发电技术等(E-mail: yelin@cau.edu.cn);

屈晓旭(1996一),女,黑龙江佳木斯

人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化、新能源发 电技术等(E-mail:qxxu@cau.edu.cn)。

Exergy analysis model of wind-solar-hydro multi-energy generation power system

YAO Yanxiang¹, YE Lin¹, QU Xiaoxu¹, WANG Weisheng², LI Pai², DONG Ling³

- (1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
 - 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. State Grid Qinghai Electric Power Company Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: The concept of exergy is introduced to represent the homogenization of multi heterogeneous energy resources such as wind energy, solar energy, water energy and so on. An exergy analysis method is adopted to calculate the efficiency of the MEGPS(Multi-Energy Generation Power System) including wind power, photovoltaic power and hydro power. The input exergy and output exergy of the MEGPS are calculated according to the proposed exergy analysis model. The efficiency indexes such as the total exergy efficiency, sustainability index and the unite exergy loss ratio for the MEGPS are proposed to evaluate the energy efficiency of the MEGPS. Case studies are carried out to prove the validity and applicability of the proposed model. The proposed method provides scientific foundation for enhancing the utilization of the MEGPS.

Key words: exergy; exergy analysis; exergy efficiency; multi-energy generation power system; energy efficiency analysis



附录 A

