

# 虚拟电厂有功调度综合评价指标体系

徐佳敏<sup>1</sup>, 孙英云<sup>1</sup>, 孙 芊<sup>2</sup>, 马建伟<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;  
2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:**为评估虚拟电厂参与电网有功调度的效果,本文根据构建指标体系的一般方法和原则,结合虚拟电厂的特点和功能,参考现有传统电厂评价体系,从可靠性、经济性、可调度性三方面提出了由7项指标构成的综合评价指标体系。其中,可靠性指标考虑虚拟电厂中可再生能源出力的不确定性及电网的平衡控制能力,通过对可调资源构建三状态转移模型、采用状态持续时间抽样法进行抽样模拟并计算,经济性指标和可调度性指标定义相应公式进行计算。为验证本文提出的指标体系的可行性及合理性,最后以河南某区域电网为例构建由风光水储组成的虚拟电厂,并根据历史运行数据计算其参与调度的基准指标,通过与实际调度周期内指标比较,根据得分验证虚拟电厂在不同场景下调度效果的优劣。结果表明本文所提综合评价指标体系与传统电厂相比更符合虚拟电厂的功能和特点,对促进可再生能源与电网协调发展具有一定的参考意义。

**关键词:**虚拟电厂;有功调度;综合评价指标体系;可再生能源;状态持续时间抽样

**DOI:** 10.12067/ATEEE1903059      **文章编号:** 1003-3076(2020)03-0032-08      **中图分类号:** TM744

## 1 引言

随着能源结构调整加快,大力开发利用可再生能源已成为世界各国的普遍共识和一致行动。但目前我国可再生能源大规模并网仍存在技术障碍,弃水、弃风、弃光现象严重<sup>[1,2]</sup>。虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)<sup>[3,4]</sup>作为一种有效技术手段,能解决可再生能源大量接入带来的电网调峰、消纳难题<sup>[5,6]</sup>,具有良好的发展前景。

虚拟电厂结构和组成方式与传统电厂相比有所不同,各虚拟电厂内部结构也不尽相同,其调控能力也存在差异。此外,虚拟电厂包含大量可再生能源,其出力波动性导致虚拟电厂出力也具有不确定性,进而使虚拟电厂对于调度指令的跟踪水平难以与传统电厂相提并论。因此,调度人员需要根据每个虚拟电厂的独特结构,给定相应基准控制指标,在下发调度指令后,通过虚拟电厂所得运行数据计算指标并与基准控制指标对比,衡量虚拟电厂参与有功调

度的效果。这就需要有目的地构建合理有效的评价指标体系来完成这一工作。

目前,针对虚拟电厂评价的研究较少且不成体系,已有的电网有功调度评价指标主要围绕传统电厂和可再生能源展开。虚拟电厂评价体系的结构和层次可参考传统电厂指标体系,文献[7,8]针对火电厂给出了层次划分和结构都比较完善的综合评价指标体系,一级指标分为可靠性、经济性、技术监督以及主要运行四类;文献[9,10]增加环保指标响应节能降耗的要求;文献[11]中分为经济、运行、运维三类指标。传统电厂各项指标的量化计算方法和评价依据参考《并网发电厂辅助服务管理细则》和《发电厂并网运行管理实施细则》。此外,可再生能源在不同目标下参与电网调度所得效果也不尽相同<sup>[12-16]</sup>。相关文献也提出了一些评价指标:经济性指标如弃风率<sup>[17-19]</sup>、水光互补评价指标<sup>[20]</sup>,技术性指标如预测准确率、预测合格率<sup>[21]</sup>、待消纳占比<sup>[22]</sup>、可再生能源渗透水平<sup>[23]</sup>、调峰不足系数<sup>[20]</sup>,

收稿日期: 2019-03-25

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGHADK00PJJS1700194)、国家重点研发计划项目(2017YFB0903300)

作者简介: 徐佳敏(1994-),女,江西籍,硕士研究生,研究方向为新能源接入电网调度评估;

孙英云(1975-),男,山东籍,教授,博士,研究方向为新能源接入、电力系统规划、分析、运行与控制(通讯作者)。

为表征电网接纳可再生能源的能力,文献[24]从多时间尺度针对调峰和调频能力也提出了相应一系列的技术响应指标。

上述研究对于虚拟电厂有功调度评价体系的构建具有一定参考意义,但无法直接应用于计算虚拟电厂基准控制指标并衡量调度效果。虚拟电厂与传统电厂的能源结构不同,传统指标如煤耗率等不再适用;在计算方法上,传统指标以水火发电机组为主体,从机组设备中获取数据并进行统计,而虚拟电厂包含电源种类较多,模型不统一,传统指标的计算方法也不再适用;而已有可再生能源并网的评价体系则表现为全面性不足。

因此,依据虚拟电厂资源分布特点,本文利用调度自动化设备所采集的运行数据,结合虚拟电厂自身功能特点及参与电网有功协调优化调度的要求,考虑电厂侧和电网侧效果的度量,按照构建评价体系的一般原则和步骤,从可靠性、经济性和可调度性三方面进行考量,构建多层次综合指标体系。最后通过河南某区域电网的实际算例验证其有效性与合理性。

2 虚拟电厂功能及调度特点

2.1 虚拟电厂基本功能

目标评价指标体系以虚拟电厂参与电网调度的效果为主体,因此需要了解虚拟电厂的功能特点。

图1为虚拟电厂的集中控制结构。通过控制中心协调,虚拟电厂可调资源包括分布式电源、储能系统(含可控负荷)。所有可调资源经信息网络与虚拟电厂控制中心进行数据交换。

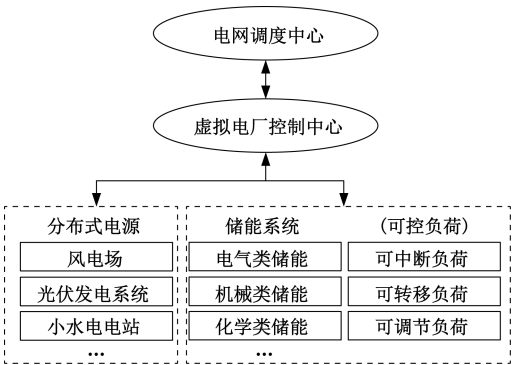


图1 虚拟电厂的集中控制结构

Fig.1 Centralized control structure of VPP

从本质而言,虚拟电厂在电网调度和内部调控资源间起着承上启下的作用。具体如下:虚拟电厂

控制中心根据各分布式电源运行参数、本地网络结构和各项约束条件来获取各分布式电源的发电能力,从而得到该虚拟电厂的运行特性及发电成本;以此为据,电网调度制定发电计划并通过信息网络将指令下发给控制中心,控制中心结合各单元的发电能力合理分配发电计划,经调度技术确认后下发指令给各单元执行计划。

2.2 虚拟电厂调度特点

虚拟电厂出力具有一定的不确定性,这是有别于传统电厂的一大特点:当上级调度下达发电指令后,本应执行相应计划的虚拟电厂内部可再生能源发电单元由于不可抗的环境等因素未能按时完成相应发电计划,使得虚拟电厂无法向外输出平稳可靠的电能。另一特点是,虚拟电厂在调控时还需考虑电网运行约束,在此基础上消纳可再生能源。因此,虚拟电厂参与电网有功调度效果的影响因素主要来源于可再生能源出力的波动性与随机性,以及电网本身的平衡控制能力。

根据评价体系构建步骤<sup>[25]</sup>,分解复杂的评价目标。参考现有传统电厂评价体系的一级指标,从可靠性、经济性、可调度性三方面分析虚拟电厂参与电网有功调度的效果。同时在一定调控策略下兼顾电厂侧和调度侧效果的度量:

- (1)可靠性:在电厂侧,虚拟电厂能否保证对外输出平稳可靠的电能。
- (2)经济性:考虑可再生能源出力,虚拟电厂的发电成本等经济水平。
- (3)可调度性:在调度侧,虚拟电厂对调度指令的响应水平以及可再生能源消纳水平、对电网的改善效果等。

3 虚拟电厂综合评价指标体系

通过上述分析,考虑虚拟电厂参与电网有功调度效果的影响因素,分别从电厂侧与电网调度侧挖掘并构建可靠性、经济性、可调度性方面的指标集。同时,调度根据控制中心所得数据,考虑覆盖率、重复率和计算难度等因素,给定各项指标的量化计算方法。最后形成虚拟电厂综合评价指标体系,如图2所示。

3.1 可靠性指标

虚拟电厂包含多种分布式能源,难以像传统电厂一样对常规机组进行可靠性评估,因此需要对虚拟电厂的运行状态进行模拟帮助分析可靠性。由于

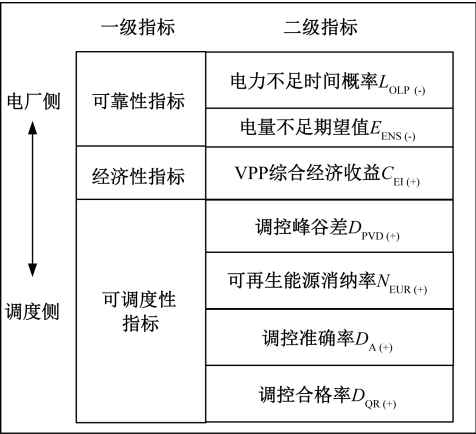


图 2 虚拟电厂参与电网有功调度综合评价指标体系  
Fig.2 Comprehensive evaluation index system of VPP participating in active power dispatching

虚拟电厂调度资源出力具有波动性和随机性,在不同时间尺度下,预测误差将导致实际虚拟电厂参与电网调度能力与策略理论值之间出现误差,造成虚拟电厂在响应有功调度时的不可靠性。传统电厂为了求解机组在任意时刻停留在工作状态或故障状态的概率,常用到 Markov 两状态模型<sup>[26]</sup>,而虚拟电厂有功调度可靠性不仅要考虑与常规机组类似的故障与修复状态,还要考虑所含可再生能源出力的波动性和随机性对可靠性带来的影响,即虚拟电厂对于调度的响应程度。

为此,在两状态模型的基础上考虑虚拟电厂的响应程度,构建了如图 3 所示三状态转移模型来表示虚拟电厂中风、光、水、储的运行状态。



图 3 三状态转移模型  
Fig.3 Three state transition model

其中,部分响应调度需求主要由预测误差导致,无法响应调度需求原因为机组故障或检修。根据虚拟电厂实际运行情况,得到组成单元的有功预测准确率 $\theta$ 、电量不足概率 $\varphi$ 、故障率 $\lambda$ 、修复率 $\mu$ 。在 $t$ 时刻其出力数学模型为:

$$P^t = \begin{cases} P_F^t & \omega = \theta \\ P_F^t + \Delta P^t = \eta P_F^t & \omega = \varphi \\ 0 & \omega = \lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\omega$  为状态概率; $P^t$  为实际出力; $P_F^t$  为预测出力; $\Delta P^t$  为预测误差,服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$  的随机

变量,其中 $\sigma = P_F^t/5 + P_Z/50$ , $P_Z$  为各组成部分的总容量;响应程度用 $\eta$  表示, $\eta \in (0,1)$ 。当 $\omega = \theta$  时,该单元完全响应调度需求,实际出力理论上与预测出力一致;当 $\omega = \varphi$  时,该单元部分响应调度需求,实际出力与预测出力存在偏差;当 $\omega = \lambda$  时,该单元无法响应调度需求,实际出力为 0。

采用序贯蒙特卡洛法<sup>[27]</sup> 针对虚拟电厂进行可靠性分析,具体采用状态持续时间抽样法来进行抽样,算法流程如图 4 所示。



图 4 状态持续时间抽样法可靠性分析流程  
Fig.4 Reliability analysis process of state duration sampling

在序贯蒙特卡洛仿真中,各状态持续时间分别为 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ ,假定元件在每一状态持续时间均服从指数分布,则状态持续时间的密度函数为:

$$\begin{cases} f(t_1) = \theta e^{-\theta t_1} \\ f(t_2) = \mu e^{-\mu t_2} \\ f(t_3) = \varphi e^{-\varphi t_3} \end{cases} \quad (2)$$

$t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  的估计值可通过反变换法得到:

$$\begin{cases} t_1 = (1/\theta) \ln \xi_1 \\ t_2 = (1/\mu) \ln \xi_2 \\ t_3 = (1/\varphi) \ln \xi_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$  均为 $[0,1]$  之间的随机数。

通过模拟抽样得到系统量化的可靠性指标:电力不足时间概率 $L_{OLP}$ ,电量不足期望 $E_{ENS}$ ,两项指标都可在较长的调度周期中计算得到稳定的基准值,满足虚拟电厂个体的可靠性要求。

(1) 电力不足时间概率

$$L_{OLP} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{N_d} D_{dk} \quad (4)$$

式中, $T$  为可靠性评估的总考核时段,为状态转移模型中三状态持续时间的总和; $N_d$  为虚拟电厂在总考核时段 $T$  中处于非完全响应调度需求状态的次数;



$D_{dk}$  为虚拟电厂参与电网有功调度过程中第  $k$  个非完全响应调度需求状态的持续时间。非完全响应调度需求状态包括部分响应调度需求状态和无法响应调度需求状态。

### (2) 电量不足期望值

$$E_{ENS} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^{N_d} [(1 - \eta_k) P_F D_{d1k} + P_F D_{d2k}] \quad (5)$$

式中,  $\eta_k$  为第  $k$  个非完全响应调度需求状态的响应程度;  $P_F$  为预测出力;  $D_{d1k}$  为虚拟电厂参与电网有功调度过程中第  $k$  个部分响应调度需求状态的持续时间;  $D_{d2k}$  为第  $k$  个无法响应调度需求状态的持续时间。

### 3.2 经济性指标

由于虚拟电厂具备减小电网负荷的波动、减少环境污染、优化资源调度等优点,考虑虚拟电厂参与电网调度后,其经济性指标不能沿用传统发电系统的经济性指标,因此提出虚拟电厂参与电网有功协调优化调度的经济性指标,即 VPP 综合经济收益  $C_{EI}$ 。

$$\begin{cases} C_{EI} = E_g + E_{fs} - C_{ec} - C_{om} - C_{es} \\ E_g = \sum_{t=1}^T (c_w P_{w,t} + c_{pv} P_{pv,t} + c_{sh} P_{sh,t}) \\ E_{fs} = \sum_{t=1}^T (P_{pv,t} + |P_{es,t}|) \varepsilon \\ C_{ec} = \sum_{t=1}^T [c_w (P'_{w,t} - P_{w,t}) + c_{pv} (P'_{pv,t} - P_{pv,t})] \\ C_{om} = \sum_{t=1}^T (k_w P_{w,t} + k_{pv} P_{pv,t} + k_{sh} P_{sh,t}) \\ C_{es} = \sum_{t=1}^T (k_{es2} P_{es,t}^2 + k_{es1} |P_{es,t}| + k_{es0}) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $E_g$ 、 $E_{fs}$ 、 $C_{ec}$ 、 $C_{om}$ 、 $C_{es}$  分别为虚拟电厂的发电收益、财政补贴、弃能成本(风光)、运维成本(风光水)及储能成本,发电收益  $E_g$  考虑风电、光伏和小水电;  $P_{w,t}$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{sh,t}$  分别为  $t$  时刻风电、光伏及小水电在一定调控策略下的出力;  $c_w$ 、 $c_{pv}$ 、 $c_{sh}$  分别为风电、光伏和小水电的上网电价;财政补贴方面考虑光伏及储能,  $P_{es,t}$  为  $t$  时刻储能设备的充放电量,放电时为正,充电时为负;  $\varepsilon$  为补贴单价;此外,由于可再生能源出力的随机性,弃能成本主要考虑风电和光伏,  $P'_{w,t}$ 、 $P'_{pv,t}$  分别为风电及光伏在  $t$  时刻的实际出力;不单独考虑储能,运维成本包含风电、光伏和小水电,  $k_w$ 、 $k_{pv}$ 、 $k_{sh}$  分别为风场、光伏电站、小水电站的运

行维护线性成本系数;储能成本中,  $k_{es2}$ 、 $k_{es1}$ 、 $k_{es0}$  为储能设备充放电成本系数。

### 3.3 可调度性指标

虚拟电厂参与电网有功协调优化调度后,需要满足一定的技术响应要求,为此给出调控峰谷差  $D_{PVD}$ 、可再生能源消纳率  $N_{EUR}$ 、调控准确率  $D_A$  和调控合格率  $D_{QR}$  来衡量虚拟电厂在调度过程中对电网的贡献及完成指令要求的效果。在不同调度周期内,可调度性指标随虚拟电厂中可再生能源出力变化而变化较大。

#### (1) 调控峰谷差

$$\begin{cases} D_{PVD} = \max(P_t) - \min(P_t) \\ P_t = P_{w,t} + P_{pv,t} + P_{sh,t} + P_{es,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_t$  为  $t$  时刻虚拟电厂出力;  $\max(P_t)$ 、 $\min(P_t)$  分别为负荷峰时和谷时虚拟电厂出力。当虚拟电厂采用一定内部调控策略时,该出力为调控出力。

#### (2) 可再生能源消纳率

$$N_{EUR} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{w,t} + P_{pv,t})}{\sum_{t=1}^T (P'_{w,t} + P'_{pv,t} + P_{sh,t})} \times 100\% \quad (8)$$

式中,分母为常规机组和可再生能源实际出力总和,分子为风光发电消纳值,在一定虚拟电厂内部调控策略下为调控后出力。

#### (3) 调控准确率

$$D_A = [1 - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^T \left( \frac{P'_t - P_t}{C_{ap}} \right)^2}] \times 100\% \quad (9)$$

式中,  $P'_t$  为  $t$  时刻虚拟电厂的实际出力;  $N$  为考核总时段数;  $C_{ap}$  为虚拟电厂场站开机容量。

#### (4) 调控合格率

$$D_{QR} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N B_j \times 100\% \quad (10)$$

$$B_j = \begin{cases} 1 & (1 - \frac{P'_t - P_t}{C_{ap}}) \times 100\% \geq A \\ 0 & (1 - \frac{P'_t - P_t}{C_{ap}}) \times 100\% < A \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $A$  的数值根据调度要求制定。

### 3.4 综合评估方法

在 3.1 节~3.3 节提出的 7 个指标基础上,本文对虚拟电厂有功调度的效果进行评估。若已知虚拟电厂的电源结构,首先电网调度中心通过长期历史数据,利用所提指标体系求出各项稳定的基准指标,该指标值可以直观地反映虚拟电厂参与电网调度的

效果。同时,根据实际调度运行情况,调度中心可从虚拟电厂获取调度周期内实际的运行数据,利用评估体系计算实际运行指标,再与基准指标进行比较,用于评价该虚拟电厂在调度周期内所呈现的效果是否能达到调度的要求。评估流程如图 5 所示。

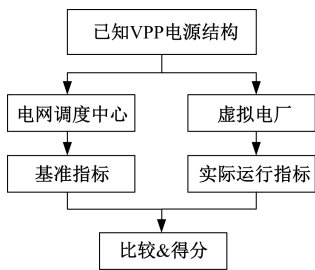


图 5 虚拟电厂参与电网调度评估

在求取实际调度效果的指标值后,为了对实际运行指标进行综合评分,需要得到各项指标的权重。本文采用熵权法对各指标定权,熵权法根据各个指标的变异概率,通过信息熵计算出各指标权重<sup>[28]</sup>,再对所有指标线性加权,从而得出较为客观的综合评价结果。

4 算例分析

4.1 算例说明

为验证所提指标的合理性和有效性,本文以河南某区域电网虚拟电厂为基本测试系统进行了数值仿真分析。虚拟电厂功率组件详细的耗量特性参数如表 1 所示。此外,区域内历史最高负荷为 30MW,  $\varepsilon$  为 0.42 元/(kW·h),  $A$  取 75%。

表 1 虚拟电厂内各功率单元参数

参数	数值			
	风电	光伏	小水电	储能
最大出力/MW	80	60	20	20
最小出力/MW	0	0	0	0
二次项/( \$/(MW <sup>2</sup> ·h))	0.00	0.00	0.00	0.01
一次项/( \$/(MW·h))	1.90	2.10	0.10	0.50
常数项/( \$/h)	0	0	0	0
上网电价/( \$/(kW·h))	0.09	0.13	0.05	-

4.2 不同运行方式下虚拟电厂参与调度效果对比

本例中只有储能为虚拟电厂中非可再生能源,以不同储能接入量来反映虚拟电厂的不同运行方式,对相应调度效果进行评价:①储能接入 VPP 为 50% 储能容量;②储能接入 VPP 为 75% 储能容量;

③储能接入 VPP 为 100% 储能容量。

评估前需对数据进行整理,对虚拟电厂在相应储能接入量下的运行数据进行筛选分类,便于后续评估。由图 5 所示评估流程,利用指标体系对该虚拟电厂的长期历史数据分析计算,得到表 2 所示该虚拟电厂调度效果的基准指标。分别改变储能装置并网容量,仿真并计算得出方案①~③的各评价指标值。对上述各指标采用熵权法确定权重,并计算各方案综合得分并标准化,分别如表 2 中所示。

表 2 不同运行方式下虚拟电厂调度效果评价

Tab.2 Standard evaluation of VPP participating in dispatching with different operation mode

指标值	基准值	方案①	方案②	方案③	熵权法权重
$L_{OLP}$ (%)	13.56	26.02	17.01	2.78	0.117
$E_{ENS}$ /MW	28.82	35.22	32.33	8.84	0.212
$C_{EI}$ /万元	4.13	5.27	5.12	4.89	0.096
$D_{PVD}$ /MW	6.07	5.83	4.86	3.35	0.099
$N_{EUR}$ (%)	85.54	88.91	87.87	97.82	0.174
$D_A$ (%)	91.32	90.32	93.33	98.33	0.129
$D_{QR}$ (%)	85.09	91.54	93.14	98.41	0.174
综合得分	1	0.738	1.145	3.581	-

对比分析不同运行方式与基准值得分可以看出,当综合得分大于或等于 1 时,该运行方式下的虚拟电厂参与有功调度日前实际运行的效果满足基准要求,且分值越大表示效果越优;反之,当综合得分在(0,1)间,则虚拟电厂有功调度的效果达不到预期的基准要求。

横向对比方案①~③之间评价指标值,可以看出,随着储能装置并网容量的提升,该虚拟电厂可靠性指标与可调度性指标值显著提升。而经济性指标则呈现先增后降趋势,这与储能调节成本增大因素有关。

上述结论进一步验证了所提评价体系的有效性,可作为调度人员对虚拟电厂进行基本考核的参考。

5 结论

针对由风光水储构成的虚拟电厂参与电网有功协调优化调度,本文提出了一套综合评价指标体系,包括可靠性、经济性、可调度性等 7 项指标。与传统电厂相比较,本文所提体系在三个层面上均有所创新:①引入响应程度建立三状态模型,采用蒙特卡洛方法来模拟和抽样,简化可靠性分析模型;②提出

VPP 综合经济收益从多方面来衡量经济水平;③构建调控峰谷差、可再生能源消纳率、调控准确率、调控合格率来反映虚拟电厂的可调度性。指标体系对虚拟电厂调度效果考量全面,满足针对虚拟电厂的调度评估要求。

本文给定了虚拟电厂调度效果的一般评估流程,并结合算例对虚拟电厂参与调控的效果进行了多种讨论,通过综合评估验证了所提指标体系的有效性和合理性。评估结果为调度人员对不同虚拟电厂进行基本考核提供了理论依据。此外,本文的研究成果还可应用于虚拟电厂有功调度综合评估软件的开发及应用,以帮助调度人员快速评测。

### 参考文献 (References):

- [1] 能源发展“十三五”规划 (13th Five-Year plan for energy development) [Z]. 北京: 国务院 (Beijing: State Council), 2016.
- [2] 可再生能源发展“十三五”规划 (13th Five-Year plan for renewable energy development) [Z]. 北京: 国家能源局 (Beijing: State Energy Administration), 2016.
- [3] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等 (Liu Jizhen, Li Mingyang, Fang Fang, et al.). 虚拟发电厂研究综述 (Review on virtual power plants) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (29): 5103-5111.
- [4] 夏榆杭, 刘俊勇 (Xia Yuhang, Liu Junyong). 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述 (Review of virtual power plant based on distributed generation) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (4): 100-106.
- [5] 潘尔生, 王新雷, 徐彤, 等 (Pan Ersheng, Wang Xinlei, Xu Tong, et al.). 促进可再生能源电力接纳的技术与实践 (Technology and practice of promoting renewable energy power accommodation) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2017, 38 (2): 1-11.
- [6] 施贵荣, 孙荣富, 徐海翔, 等 (Shi Guirong, Sun Rongfu, Xu Haixiang, et al.). 大规模集群可再生能源有功分层协调控制策略 (Active power stratification coordination control strategy for large-scale cluster of renewable energy) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (7): 1-7.
- [7] 满若岩, 付忠广 (Man Ruoyan, Fu Zhongguang). 基于模糊综合评判的火电厂状态评估 (Condition assessment of fossil-fired power plant based on fuzzy comprehensive evaluation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2009, 29 (5): 5-10.
- [8] 袁桂丽, 张健华, 王田宏, 等 (Yuan Guili, Zhang Jianhua, Wang Tianhong, et al.). 基于 TOPSIS 灰色关联投影法的火电厂节能综合评价与权重灵敏度分析 (Comprehensive energy-saving evaluation of thermal power plants based on TOPSIS gray relational projection and the weight sensitivity analysis) [J]. 动力工程学报 (Journal of Chinese Society of Power Engineering), 2015, 35 (5): 404-411.
- [9] 商立群, 王守鹏 (Shang Liquan, Wang Shoupeng). 改进主成分分析法在火电机组综合评价中的应用 (Application of improved principal component analysis in comprehensive assessment on thermal power generation units) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (7): 1928-1933.
- [10] 王守鹏, 赵冬梅, 商立群, 等 (Wang Shoupeng, Zhao Dongmei, Shang Liquan, et al.). 基于主成分聚类分析的火电机组综合评价方法 (Comprehensive evaluation method for thermal power units based on principal component analysis and cluster analysis) [J]. 热力发电 (Thermal Power Generation), 2017, 46 (5): 74-79.
- [11] 李勇, 何蕾, 庞传军, 等 (Li Yong, He Lei, Pang Chuanjun, et al.). 基于层次分析法的火电厂运行情况量化评价方法 (An analytical hierarchy process based quantitative method to evaluate operating condition of thermal power plant) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (2): 500-504.
- [12] 卢锦玲, 张津, 丁茂生 (Lu Jinling, Zhang Jin, Ding Maosheng). 含风电的电力系统调度经济性评价 (Economic evaluation of power system dispatch integrated with wind power) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (8): 2258-2264.
- [13] 屈姬贤, 刘纯, 石文辉, 等 (Qu Jixian, Liu Chun, Shi Wenhui, et al.). 基于风电接纳空间电量回归模型的弃风率快速计算方法 (A fast evaluation method for wind power curtailment ratio based on regression model of electric energy of wind power accommodating space in power grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (1): 72-78.
- [14] 丁明, 楚明娟, 毕锐, 等 (Ding Ming, Chu Mingjuan, Bi Rui, et al.). 基于序贯蒙特卡洛随机生产模拟的风电接纳能力评价方法及应用 (Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2016, 36 (9): 67-73.
- [15] 田旭, 张祥成, 白左霞, 等 (Tian Xu, Zhang Xiangcheng, Bai Zuoxia, et al.). 青海省水电与光伏互

- 补特性分析与效果评价 (Characteristic analysis and effect evaluation of synergy between hydropower and photovoltaic power in Qinghai province) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2015, 36 (10): 67-72.
- [16] 严丽萍, 刘睿, 陆晓岚 (Yan Liping, Liu Rui, Lu Xiaolan). 可再生能源电站并网考核评价研究 (Research on new energy station paralleling assessment and evaluation) [J]. 青海电力 (Qinghai Electric Power), 2014, 33 (1): 45-47.
- [17] 蔡佳铭, 林其友, 刘涌 (Cai Jiaming, Lin Qiyong, Liu Yong). 高占比可再生能源系统消纳能力指标评估与分析 (Index analysis and evaluation of consumption capacity for high proportion renewable energy system) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2018, 55 (7): 53-61.
- [18] 胡博文, 艾欣, 黄仁乐, 等 (Hu Bowen, Ai Xin, Huang Renle, et al.). 考虑风-光消纳和环境效益的多目标模糊优化调度模型 (Multi-objective fuzzy optimal dispatching model by considering both wind photovoltaic power accommodation and environmental benefits) [J]. 现代电力 (Modern Electric Power), 2017, 34 (3): 36-43.
- [19] 刘敦楠, 李奇, 秦丽娟, 等 (Liu Dunnan, Li Qi, Qin Lijuan, et al.). 电网多时间尺度接纳可再生能源能力评估指标体系 (Evaluation of grid accepting renewable energy in multi-time scale) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2017, 38 (7): 44-50.
- [20] 张晓辉, 梁军雪, 李茂林, 等 (Zhang Xiaohui, Liang Junxue, Li Maolin, et al.). 计及风光出力预测误差的电力系统经济调度 (Economic dispatch of power system considering prediction error of wind and photoelectric output) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 40-47.
- [21] 厉伟, 颜宁, 张博, 等 (Li Wei, Yan Ning, Zhang Bo, et al.). 基于情景分析法风电场中储能系统经济调度 (Economic dispatch of energy storage system in wind farm based on scenario analysis method) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 47-52.
- [22] 肖浩, 裴玮, 孔力, 等 (Xiao Hao, Pei Wei, Kong Li, et al.). 综合能源微网运行优化调度方法研究 (Research on optimal operation method of integrated energy microgrid system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (12): 1-11.
- [23] 李国栋, 庞文杰, 葛磊蛟, 等 (Li Guodong, Pang Wenjie, Ge Leijiao, et al.). 基于改进雷达图法的光伏并网发电系统稳态电能质量综合评估 (Steady-state power quality synthetic evaluation of grid-connected photovoltaic system based on improved radar chart) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 8-12, 35.
- [24] 王凯, 栗文义, 李龙, 等 (Wang Kai, Li Wenyi, Li Long, et al.). 含风/光互补发电系统可靠性与经济性评估 (Reliability and economy evaluation of complementary power systems containing wind and solar energy) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (6): 52-56, 63.
- [25] 张杰 (Zhang Jie). 效能评估方法研究 (Research on effectiveness evaluation method) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defense Industry Press), 2009.
- [26] 程林, 何剑 (Cheng Lin, He Jian). 电力系统可靠性原理和应用 (第2版) (Principle and application of power system reliability (Second Edition)) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2015.
- [27] 暴英凯, 王越, 唐俊熙, 等 (Bao Yingkai, Wang Yue, Tang Junxi, et al.). 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析 (Application difference analysis of sequential Monte Carlo method in reliability assessment of power system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (5): 1189-1195.
- [28] 朱喜安, 魏国栋 (Zhu Xi'an, Wei Guodong). 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨 (Discussion on the excellent standards of dimensionless method in entropy method) [J]. 统计与决策 (Statistics & Decision), 2015, (2): 12-15.

# A comprehensive evaluation index system of VPP participating in active power dispatching

XU Jia-min<sup>1</sup>, SUN Ying-yun<sup>1</sup>, SUN Qian<sup>2</sup>, MA Jian-wei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** To evaluate the effect of virtual power plant (VPP) participating in active power dispatching, this paper proposes a comprehensive evaluation index system including 7 indexes. The system consists of three aspects: reliability, economy and schedulability, which referring to present evaluation systems of traditional power plant. And the system is based on general principles of constructing evaluation index system with characteristics and functions of VPP. For reliability indexes, output uncertainty of new energy in VPP and balance control ability of power grid are considered to build a three state transition model for controllable resources in VPP, and calculation is finished by simulation sample using state duration sampling. For economy and schedulability indexes, corresponding definitions and formulations are given. A regional power grid in Henan province is taken as an example to provide VPP composed of wind power, photovoltaic, small hydropower and energy storage. To verify the rationality and effectiveness of the proposed evaluation system, VPP with different energy storage capacity represent VPP with different power supply, then standard evaluation of the VPP participating in dispatching is put forward through the evaluation system. Comparing it with the practical evaluation, the standardized score reflects whether the effect of different VPP is good or not. Results show that the proposed comprehensive evaluation index system differs from that of the traditional power plant which reflects characteristics and functions of VPP, and is significant to promote the coordinated development of new energy and power grid to some extent.

**Key words:** virtual power plant (VPP); active power dispatching; comprehensive evaluation index system; renewable energy; state duration sampling