

高比例新能源电力系统灵活性资源 充裕性评估分析

蔡文斌¹,程晓磊¹,南家楠¹,吕海霞¹,李晔¹,李静宇²

(1. 内蒙古电力经济技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要:随着我国实现双碳目标的提出,未来会有更高比例的新能源接入电网。提出了一种用于对含高比例新能源的电力系统灵活性资源的充裕性进行评估的分析方法。所提出的灵活性资源的充裕性指标可以根据净负荷变化的周期曲线特征来评估灵活性容量需求与运行备用需求的关系。所提周期曲线模型可以表示净负荷变化量和变化率的发生概率。因此除了可以评估含高比例新能源的电力系统的充裕性外,还可以评估灵活性资源的充裕性。最后,通过模拟典型的电力供需平衡场景对所提方法的指标进行了仿真验证。

关键词:新能源;不确定性;灵活性资源充裕性;电力供需平衡

中图分类号:TM46;TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23526

Assessment and Analysis of Adequacy of Flexibility Resource of Power System with High Proportion New Energy

CAI Wenbin¹, CHENG Xiaolei¹, NAN Jianan¹, LÜ Haixia¹, LI Ye¹, LI Jingyu²

(1. Inner Mongolia Electric Power Economic and Technical Research Institute, Hohhot 010020, Nei Monggol, China; 2. School of Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, Nei Monggol, China)

Abstract: With the proposed goal of achieving double carbon in China, a higher proportion of new energy will be connected to the grid in the future. An analysis method was proposed for assessing the adequacy of flexibility resources of power system with a high proportion new energy. The adequacy index of proposed flexibility resource can be used to assess the relationship between flexibility capacity demand and operational reserve demand based on the characteristics of the cycle curve of net load variation. The proposed cycle curve model can represent the probability of occurrence of the amount and rate of change of net load. Thus the adequacy of flexibility resources can be evaluated in addition to the adequacy of power systems containing a high proportion of new energy. Finally, the metrics of the proposed method were validated by simulating a typical power supply and demand balance scenario.

Key words: new energy; uncertainty; adequacy of flexible resource; power supply and demand balance

随着我国30、60碳达峰和碳中和目标的提出,未来电力系统中新能源的比例会得到进一步提升,同时高比例的新能源接入给电力系统的安全性、充裕性带来新的挑战。但是电网原有的发电系统和输电系统并没有得到与之相适应的发展来应对新能源的高渗透率,不能为电网的灵活性提供有效的支撑。由于以新能源为代表的分布式电源的发展,使得电力系统的规划和运行条件更加易变和不确定^[1]。随着新能源发电的增

长,需要更深入地研究高比例新能源发电接入对于电力系统的安全性和经济性的影响。由于新能源(如风能和太阳能)的出力不确定性,使得电力系统的运行和控制变得更为复杂。大量新能源的并网将从秒级、小时级、日内等多种时间尺度上对电力系统的可靠性产生不利影响^[2]。

在新能源渗透率逐年升高的情况下,系统内资源充裕性评估需要灵活应对负荷需求的变化。传统的资源充裕性评估方法如失负荷率(loss of

基金项目:内蒙古自然科学基金(2020BS05002);内蒙古电力(集团)有限责任公司科技项目(2020-84)

作者简介:蔡文斌(1977—),男,本科,高级工程师,Email:17538372@qq.com

load probability, LOLP)、失负荷期望 (loss of load expectation, LOLE)等可以很好地评估包括备用在内的最大供电能力,但不能从灵活性的角度评估资源充裕性。因此如何对系统的灵活资源充裕性进行评估成为了当今电力系统的热点研究之一^[3]。

近年来在电力系统灵活性资源及系统充裕性评估方面已经有学者展开了一定研究并取得了相应的成果。文献[4]基于灵活性供需平衡机理,提出了广义灵活电源的概念,并建立了计及灵活性资源的双层统筹规划模型;文献[5]提出了一种基于近邻传播算法(affinity propagation, AP)聚类和两阶段鲁棒优化的电网规划灵活性评估方法及基于时间断面的规划评估性指标。文献[6]通过建立电力系统向上/下发电容量不足指标来描述电力系统的发电容量充裕度和灵活性。以上几类研究多以新能源为研究对象从电源的角度对系统的灵活性进行刻画,而忽略了电力负荷的灵活性。

综上所述,在计及灵活性资源的系统充裕性方面的研究目前还处于摸索阶段。电力系统资源充裕评估的基本问题是确定电力系统应增加的发电机的类型和数量,以使未来的负荷需求能够以最小的成本得到满足,并满足系统的可靠性要求。由于资源充裕性评估问题涉及的是一个长期的规划,因此这类问题中不可避免地包含了许多不确定因素。此外,由于新能源渗透率的不确定性,使得电力系统资源充裕性评估变得更加困难。

本文提出一种用于评估高比例新能源接入电力系统的灵活资源充裕性的方法。该方法可以根据新能源的负荷需求(净负荷)持续时间来评估灵活的容量需求。该方法可以用于评估灵活性资源在电力供应的充裕性。还可以用于分析充裕性和生产成本之间的平衡关系。

1 灵活性资源充裕性评估方法

系统灵活性资源充裕性评估方法的概念如图1所示,该方法包括4个方面:可再生能源的负荷需求分析、考虑新能源接入的资源充裕性评估、灵活性容量需求评估以及考虑备用容量的生产成本研究。该方法的目的是确定经济性和可靠性之间的关系,如常规发电、抽水蓄能电站和联络线等。计及电力系统灵活性的可靠性指标

可以通过考虑电力系统灵活性的资源充足性评估(灵活容量需求评估)和考虑备用容量^[7]的生产成本研究之间的权衡关系来分析。

这里考虑权衡分析的参数是火电、抽水蓄能发电和并网输电线路等资源的灵活容量和爬坡速度,通过净负荷变化的幅度和速度的持续曲线来反映系统净负荷变化。

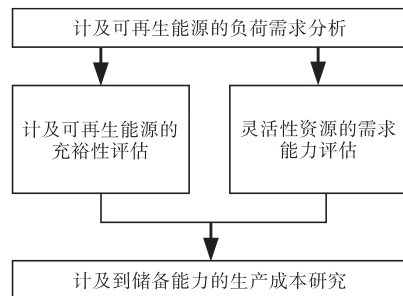


图1 灵活性资源充足率评估方法的内涵

Fig.1 Implications of a flexible resource adequacy assessment methodology

1.1 新能源电力系统的负荷需求分析

在分析新能源电力系统的负荷需求时,净负荷可以分解为负载率、负载的持续波动^[8],这里波动的幅度和速度可以转换成持续时间曲线,并根据获得的持续时间曲线来研究灵活性容量的需求。假设不考虑净负荷的连续性并且电力系统灵活性评估的效果可以通过电力系统运行方式来校验^[9]。

在分析例如大规模太阳能发电接入的新能源电力系统的净负荷波动时,我们通常采用“鸭型曲线”^[10]的分析方法,鸭型曲线变化的形状可以被视为净负荷的下降和上升。通过鸭型曲线可以得到峰值需求与新能源生产之间的时间不平衡关系,并以此来评估灵活性容量需求。图2给出了典型的鸭型曲线的形状。鸭型曲线运行中可能的备用容量是否充足,可以通过灵活性能力需求评估指标进行评估。

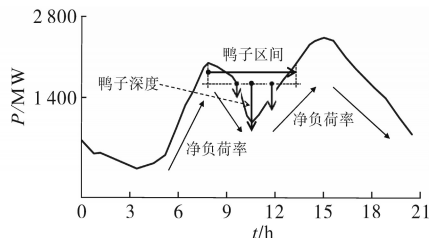


图2 鸭型曲线

Fig.2 Duck curve

1.2 计及新能源的资源充裕性评估

现有的新能源置信容量的评估方法主要通过有效承载能力(effective load carrying capability,

ELCC)^[11]来表示,这里ELCC考虑了新能源出力的不确定性。然而在大量新能源接入系统的情况下,电力系统故障可能导致大量新能源出力下降。

为此我们提出了的新能源供电可靠性的指标。该指标用有效承载能力来计算计及新能源的强制停电率的新能源发电置信容量,并类比于常规发电机组的供电能力和LOLP/LOLE指标。在给定年净负荷持续时间曲线(即提供每个净负荷的发生概率)的情况下,计及新能源强迫停电率的LOLP可由下式计算:

$$LOLP = \sum_{k=1}^N P_r(C_k - E_k) \cdot P_r(E_k) \quad (1)$$

式中: $P_r(C_k - E_k)$ 为新能源在负荷水平 E_k 下计及强迫停电率的系统供电不足概率; E_k 为持续时间 k 的负荷水平; C_k 为在持续时间 k 内使用新能源的供电容量; $P_r(E_k)$ 为负荷水平 E_k 出现的概率。

1.3 灵活性容量需求评估

灵活的容量需求评估方法是基于与传统的概率评估方法(如LOLP/LOLE)的类比^[12]。该方法可以通过净负荷负载率的幅度和速度的持续曲线对备用容量是否充足进行评价。该方法以失备用概率(loss of reserve capacity probability, LORP)作为备用容量是否充足的指标。在给定每周或每天净负荷负载率的幅度和速度的持续时间曲线的情况下,LORP可由下式计算得到。

$$LORP = \sum_{k=1}^N P_r(RC_k - RR_k) \cdot Pr(RR_k) \quad (2)$$

式中: $P_r(RC_k - RR_k)$ 为在必要的灵活性容量水平上 R_k 的备用不足概率; RC_k 为持续时间 k 的备用容量; RR_k 为持续时间 k 必要的灵活性容量; $P_r(RR_k)$ 为必要的灵活容量 RR_k 出现的概率。

2 考虑备用的生产成本函数

传统的生产成本法研究可以很好地评估由发电机固定成本和可变成本组成的年度总成本,然而这些方法不能用于评估发电机所带部分负荷运行中由于有效容量和发电效率损失而产生的额外成本。

本文提出了一种考虑备用容量的生产成本法。在给定发电机组的情况下,所提出的方法可以提供供电容量的等效成本函数,并可以将备用容量的额外成本作为等效成本函数中固定成本和可变成本的增量成本,等效成本如图3

所示。

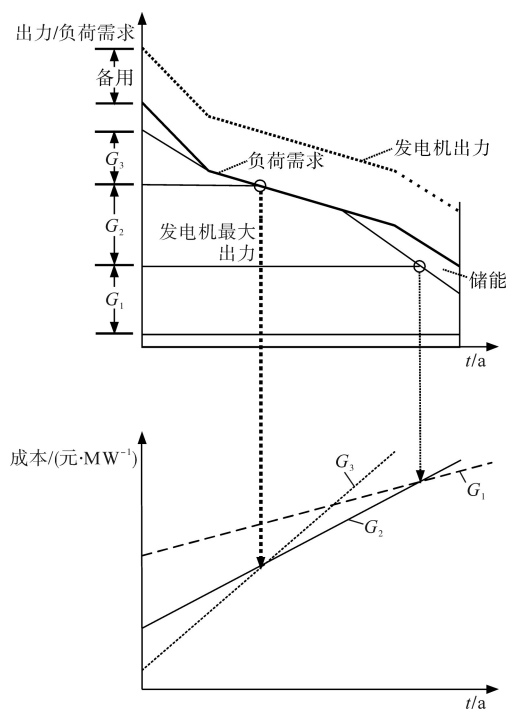


图3 年生产成本的等效成本函数

Fig.3 Equivalent cost function for annual production costs

供电容量的函数可以通过求解一种最优的系统机组组合问题的逆问题来推导。假设所有的可变成本给出的都是发电机和参考发电机的固定成本。这里给定一个时间段(如1 a)备用容量的平均值,因此计及备用容量的发电机修正后的固定成本可由下式计算得到:

$$b' = \frac{b}{1 - R_{ave}} \quad (3)$$

其中

$$R_{ave} = \sum_{k=1}^n R_k / n$$

式中: R_{ave} 为在 $k=1, 2, \dots, n$ 的时间段内的备用容量 R 的平均值; b 为计及发电机的固定成本的修正后备用容量的固定成本,元/MW; b' 为等效成本函数中发电机的固定成本,元/MW; R_k 为某一时期 k 的备用容量,MW。

3 算例分析

本文以一个典型电力供需平衡场景为例,对所提出方法的概念进行了仿真,该问题有常规火电机组、燃气机组、水电机组、抽水蓄能发电机组等6种资源。表1为各类电厂参数。

首先对大规模新能源接入的净负荷负载率波动的灵活容量需求评估进行分析。图4为某地区的

表1 各类电厂参数

Tab.1 Various types of power plant parameters

	可变成本/ [元·(kW·h ⁻¹)]	固定成本/ (元·kW ⁻¹)	额定容量/ MW	机组 数量	总容量/ MW	强迫停机率/ (%·a ⁻¹)	最大出力/ (MW·机组 ⁻¹)	最低出力/ (MW·机组 ⁻¹)
火电机组	8	45 000	1 000	4	4 000	2.5	1 000	300
燃气机组	10	40 000	700	39	27 300	2.5	700	140
燃油机组-1	15	35 000	700	10	7 000	2.5	700	175
燃油机组-2	20	30 000	500	7	3 500	2.5	500	100
水电机组	0	50 000	1 000	2	2 000	0.5	1 000	250
抽蓄机组	0	75 000	1 000	7	7 000	0.5	1 000	250

年净负荷曲线,其中最大负荷需求为40 261 MW,光伏发电总额定容量为24 888 MW。图5所示为日净负荷曲线,其有典型的“鸭型曲线”年净负荷的特点。

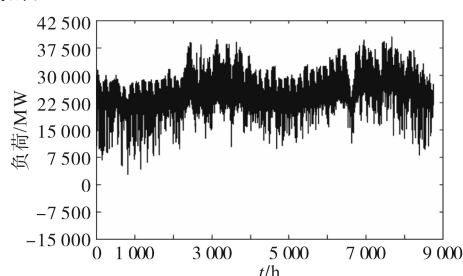


图4 年净负荷曲线

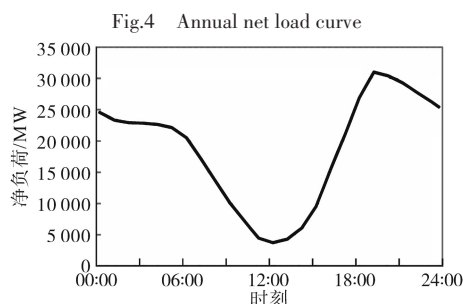


图5 日净负荷曲线
Fig.5 Daily net load curve

3.1 新能源电力系统的负荷需求分析

在考虑高比例新能源接入的系统找出最大的净负荷上升/下降负载率,对于评估灵活的容量需求非常重要。最大爬坡的周净负荷曲线如图6所示,图7给出了周净负载率曲线。然后将包含爬坡波动最大量级的周内时间序列转换为如图8所示的周持续时间曲线。

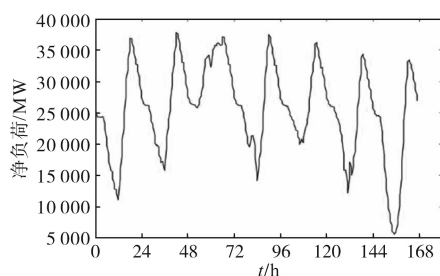


图6 计及净负荷最大增速的周负荷曲线
Fig.6 Curve of weekly load maximum ramp-up

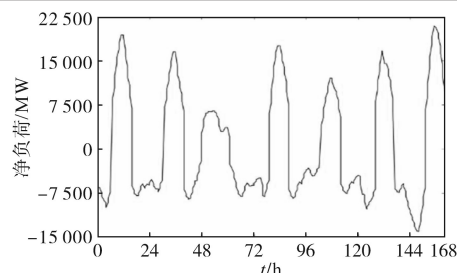


图7 计及最大增幅的周负增长曲线

Fig.7 Curve of weekly load ramp with maximum ramp-up

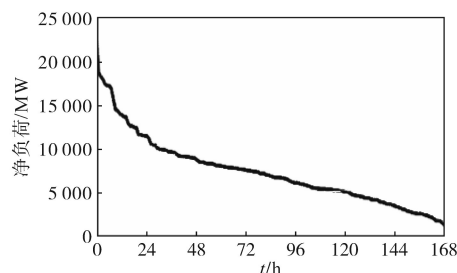


图8 净负荷增长的周持续时间曲线

Fig.8 Curve of weekly duration of the net load ramp

图9给出了图2所定义的年度鸭型曲线深度的变化趋势,进而可以得到如图10所示的鸭型深的变化趋势,进而可以得到如图10所示的鸭型深的变化趋势,进而可以得到如图10所示的鸭型深的变化趋势。

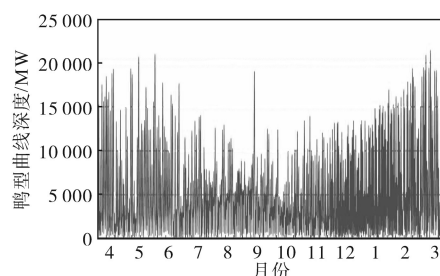


图9 年度鸭型曲线深度变化趋势

Fig.9 Annual duck curve depth analysis variation trend

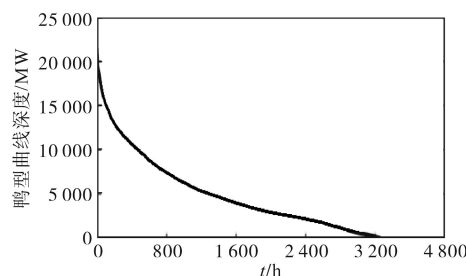


图10 鸭型曲线深度的年度持续时间曲线

Fig.10 Annual duration curve of duck curve depth

度的年持续时间曲线。对于鸭型曲线的灵活性容量需求,可以根据所得到的鸭型曲线深度的年持续时间曲线进行校验。以类似的方式还可以得到二级备用需求的年度持续时间曲线,如图11所示。二级备用容量可以通过在所得到的年度持续时间曲线上进行调节能力需求的校验。

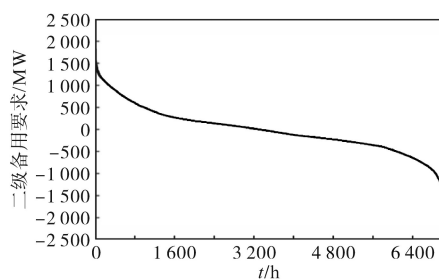


图11 二级备用需求的年度持续时间曲线

Fig.11 Annual duration curve of secondary reserve demand

3.2 计及新能源的资源充裕性评估

所提出的计及新能源接入的灵活性资源充裕性评估指标,如2.2节所述新能源的置信容量,可以视作与传统发电一样的供电能力。因此可以通过有效承载能力(ELCC)计算出计及新能源强迫停电率 $LOLP$ 。在给定负荷持续时间曲线的情况下,计及到新能源的 $LOLP$ 可以用式(1)计算。

表2列出了基于有效承载能力方法计算出的新能源月度负荷持续时间曲线的置信容量。由此可见,在新能源的强制停电率下,新能源与传统发电具有相同的供电能力。

表2 基于ELCC的可再生能源容量

Tab.2 ELCC-based renewable power capacity

月份	容量百分比/%	容量/MW
4月	23.04	8 038
5月	24.73	8 629
6月	30.81	10 748
7月	35.65	12 439
8月	45.8	15 977
9月	28.54	9 957
10月	15.41	5 377
11月	0.5	174
12月	0.5	174
1月	0.5	174
2月	12.44	4 341
3月	0.5	174

表3给出了不同月份下计及新能源的置信容量的 $LOLP$ 指标的计算结果。该结果可用于评估含有高比例新能源接入的电力系统的供电备

用容量是否充足, $LOLP$ 越小,则表示备用容量越充足。

表3 基于 $LOLP$ 的新能源的容量裕度

Tab.3 $LOLP$ -based pumped storage operating capacity

月份	出力/MW	需求/MW	裕度/%	$LOLP/h$
4月	46 000	41 539	10.7	0.483 1
5月	43 000	39 563	8.7	2.194 3
6月	48 700	44 045	10.6	0.308 1
7月	60 200	55 307	8.9	0.353 5
8月	60 800	55 655	9.2	0.222 3
9月	56 800	51 098	11.2	0.190 1
10月	47 900	43 514	10.1	0.468 8
11月	47 600	43 544	9.3	0.524 8
12月	53 900	49 648	8.6	0.249 2
1月	56 800	51 218	10.9	0.222 6
2月	58 600	52 793	11.0	0.255 9
3月	52 900	48 764	8.5	0.371 7

3.3 灵活性容量需求评估

利用基于动态最优潮流算法^[13]确定目标周的发电组合和爬坡备用容量,计算出每周净负荷升压时的 $LORP$ 。然后计算出每周净负荷爬坡时的爬坡备用容量的 $LORP$,这里以抽水蓄能运行容量作为额外的爬坡备用容量的参数。

抽水蓄能运行容量的 $LORP$ 计算结果如表4所示。抽水蓄能运行容量的值可以从备用容量是否充足的角度进行评估。从表中可以看出,随着抽蓄容量的增加,系统的失备用概率降低,最低可比没有抽蓄加入时减小近80%,弃电功率减少12 392 MW·h。

表4 基于 $LORP$ 的抽水蓄能运行容量

Tab.4 $LORP$ -based pumped storage operating capacity

抽蓄机组/ MW	出力/ MW	需求/ MW	$LORP/h$	限电容量/ (MW·h)
0	97 806	12 621	8.4	14 561
2 500	10 527	12 621	3.2	11 560
5 000	142 503	12 621	1.7	2 169

3.4 考虑备用容量的生产成本研究

根据所提出的生产成本方法计及备用容量的生产成本可以提供备用容量的额外成本,作为成本函数中固定成本和可变成本的增量。表5给出了在3月15日和3月22日之间的一周内通过式(3)计算的发电机的修正固定成本。给出了考虑电力系统灵活性的资源充足性评估和考虑备用容量的生产成本之间的权衡分析。

表5 修正后的发电机固定费用(3-15-3-22)

Tab.5 Modified fixed costs of generators (3-15-3-22)

机组	抽水蓄能电站额定容量/MW		
	0	3 000	7 000
火电机组	0.42	0.42	0.42
燃气机组	0.225	0.225	0.225
燃油发电机组-1	0.634	0.634	0.634
燃油发电机组-2	0.524	0.524	0.524
水电机组	0.726	0.726	0.726
抽蓄机组	0	0.025 5	0.021

4 结论

本文提出了一种评估电力系统灵活性资源充裕性分析方法,该方法给出了电力系统灵活性的资源充裕性评价指标。所提出的方法通过分析基于净负荷波动的持续时间曲线特征,对灵活运行备用容量需求进行评估,并以某实际电网数据建立仿真场景,对所提方法进行了验证。未来需要进一步针对净负荷特点研究与之相适应的系统灵活性评价体系。

参考文献

- [1] 谢鹏,蔡泽祥,刘平,等.考虑多时间尺度不确定性耦合影响的风光储微电网系统储能容量协同优化[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7126-7136,7486.
Xie Peng, Cai Zexiang, Liu Ping, *et al.* Cooperative optimization of energy storage capacity for renewable and storage involved microgrids considering multi time scale uncertainty coupling influence[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (24) : 7126-7136, 7486.
- [2] 孙珂,赵鹏飞,韩晓男,等.考虑高比例可再生能源出力不确定性的电力流规划方法[J].电网技术,2020,44(1):89-95.
Sun Ke, Zhao Pengfei, Han Xiaonan, *et al.* Electricity flow planning method for high penetration of renewable energy[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 89-95.
- [3] 马望,高红均,李海波,等.考虑智能软开关的配电网灵活性评估及优化调度模型[J].电网技术,2019,43(11):3935-3943.
Ma Wang, Gao Hongjun, Li Haibo, *et al.* Flexibility evaluation and optimal dispatch model of distribution network considering soft open point[J]. Power System Technology, 2019, 43 (11) : 3935-3943.
- [4] 李海波,鲁宗相,乔颖.源荷储一体化的广义灵活电源双层统筹规划[J].电力系统自动化,2017,41(21):52-60,110.
Li Haibo, Lu Zongxiang, Qiao Ying. Bi-level optimal planning of generation-load-storage integrated generalized flexibility resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (21): 52-60, 110.
- [5] 魏联滨,王伟臣,李慧,等.基于AP聚类 and 鲁棒优化的电网规划灵活性评估[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(3):99-106,150.
Wei Lianbin, Wang Weichen, Li Hui, *et al.* Evaluation on grid planning flexibility based on affinity propagation clustering and robust optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32 (3): 99-106, 150.
- [6] 马静洁,张少华,李雪,等.发电系统充裕度与灵活性的随机评估[J].电网技术,2019,43(11):3867-3874.
Ma Jingjie, Zhang Shaohua, Li Xue, *et al.* Stochastic assessment of adequacy and flexibility of power generation systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3867-3874.
- [7] 张惠忠,周嘉新,张雅雯.含源-荷-储的虚拟电厂经济性优化运行研究[J].电气传动,2021,51(9):55-60,66.
Zhang Huizhong, Zhou Jiaxin, Zhang Yawen. Research on economic optimization operation of virtual power plant with source-load-storage[J]. Electric Drive, 2021, 51(9): 55-60, 66.
- [8] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.
Zeng Jie, Zhang Chi, Yuan Zhichang, *et al.* Research on control strategy of DC distribution grid with balanced load ratio between connected AC zones[J]. Electric Drive, 2019, 49(9): 46-51.
- [9] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2):922-931.
- [10] Ahmad S S, Al-Ismail S, Almhizia A A, *et al.* Model predictive control approach for optimal power dispatch and duck curve handling under high photovoltaic power penetration[J]. IEEE Access, 2020, 8: 186840-186850.
- [11] 张振宇,王文倬,张小奇,等.基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法[J].电网技术,2021,45(2):632-639.
Zhang Zhenyu, Wang Wenzhuo, Zhang Xiaoqi, *et al.* Renewable energy capacity planning based on carrying capacity indicators of power system[J]. Power System Technology, 2021, 45 (2): 632-639.
- [12] 周明,李琰,李庚银.基于随机生产模拟的日前发电-备用双层决策模型[J].电网技术,2019,43(5):1606-1613.
Zhou Ming, Li Yan, Li Gengyin. A day-ahead power generation-reserve bi-level decision-making model for power system based on probabilistic production simulations[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1606-1613.
- [13] Fang X, Sedzro K S, Yuan H Y, *et al.* Deliverable flexible ramping products considering spatiotemporal correlation of wind generation and demand uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2561-2570.

收稿日期:2021-05-19

修改稿日期:2021-06-06