

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201381

高比例可再生能源系统惯量约束对灵活性分析的影响研究

江涵¹, 岳程燕², 严兴煜¹, 侯俊贤², 刘舒然², 赵腾¹

(1. 全球能源互联网发展合作组织(全球能源互联网集团有限公司), 北京 100031;

2. ABB 电网投资(中国)有限公司, 北京 100016)

摘要: 在风电、光伏等间歇式可再生能源大量接入系统的背景下, 系统惯量降低造成的系统频率稳定问题越来越突出, 在灵活性资源配置中有必要考虑系统惯量的影响。从系统灵活性分析的角度出发, 首先介绍了高比例可再生能源接入后净负荷的特点以及基于系统发电机惯量和容量的系统惯量计算方法。然后, 在此基础上, 基于系统最大频率变化率限制和最大功率变化量, 提出了系统最低惯量的计算方法。最后结合灵活性的分析过程, 提出了考虑最低惯量约束在灵活性分析中的考虑方法。该方法应用于灵活性资源优化过程中, 可以改变系统低惯量状态下的灵活性资源配置, 提高系统惯量, 进而提高系统的频率稳定性, 实现系统灵活性、频率特性的有机结合。

关键词: 灵活性资源; 惯量; 间歇式可再生能源; 互联系统

Influence of system inertia on flexibility resource analysis for an interconnection system with a high proportion of intermittent renewable energy

JIANG Han¹, YUE Chengyan², YAN Xingyu¹, HOU Junxian², LIU Shuran², ZHAO Teng¹

(1. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (Global Energy Interconnection Group Co., Ltd.), Beijing 100031, China; 2. ABB Power Grid Investment (China) Co., Ltd., Beijing 100016, China)

Abstract: There are now many intermittent renewable energy sources such as wind power and PV being connected to the power system. This occasions a problem of system frequency stability caused by system inertia reduction which becomes increasingly prominent, and it is necessary to consider the influence of system inertia in flexible resource allocation. For system flexibility analysis, this paper introduces the characteristics of net load after a high proportion of renewable energy is connected and offers a calculation method of system inertia based on system generator inertia and capacity. Then, a calculation method for the lowest inertia of the system is proposed based on the maximum frequency change rate and maximum power change. Finally, combining with the process of flexibility analysis, a method to examine the minimum inertia constraint in flexibility analysis is proposed. This method is applied in the process of flexible resource optimization. This can change the flexible resource allocation in the low inertia state of the system, improve the inertia and the frequency stability of the system, and realize the combination of system flexibility and frequency characteristics.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China “Multi-Energy Collaboration based Distributed Renewable Energy High-Proportion Consumption and Efficient Utilization” (No. 51961135101).

Key words: flexibility resource; inertia; intermittent renewable energy; interconnection system

0 引言

多年来, 低碳化目标的实施、投资成本的降低、国家政策的推动, 使得可再生能源得到快速发展, 其中风电、光伏等间歇式可再生能源的占比逐渐提高,

并逐渐成为主要的发电形式。2010—2019年, 世界新能源发电量平均年增长率达到20.5%, 其中风能和太阳能的平均增长率分别达到16.3%和40.1%^[1]。世界各国的可再生能源都得到快速发展, 并在未来占有较高的比重。

欧盟计划到2050年, 温室气体排放减少80%~95%(相对于1990年)^[2]。为了达到这个目标, 需要在各个能源消费领域进行变革, 包括电力、工业、

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“多能协同的分布式可再生能源高比例消纳与高效利用”(51961135101)

交通等, 其中电力部分需要接近于 0。电气化是能源消费中的一个主要的发展趋势, 加热和制冷负荷的电气化、电动汽车的发展等, 都增加了电力的消耗。发电资源受政策、技术经济性、燃料价格等因素的影响, 短期内主要受到政策的推动, 可再生能源得到快速发展, 后期主要依赖市场的推动, 可再生能源仍然继续保持增长。预期到 2050 年, 风电、光伏等间歇式可再生能源的装机比例预期超过 50%, 发电量预期超过 36%^[3]。

美国逐渐采用天然气和可再生能源替换老化的煤电和核电, 可再生能源将逐渐成为主要的电源形式, 其中风电、光伏等间歇式可再生能源占有较大比重。2019 年, 美国的可再生能源发电量就开始接近和超过煤电的发电量。预期到 2050 年, 可再生能源的占比从目前的 19% 扩大到 38%, 用于调峰的天然气发电将会占到 36%, 核电和煤电的发电量将会明显降低。其中的可再生能源中, 风电和光伏的占比接近 80%^[4]。

我国的风电、光伏等新能源也得到快速发展。截至 2019 年底, 风电和光伏的装机容量已经突破 4 亿 kW, 占总装机容量的 20.6%。其中, 风电累计装机容量占总装机容量的 10.4%, 光伏占 10.2%。风电和光伏的发电量占总发电量的 8.6%^[5]。我国终端能源消费也将会呈现电气化的发展趋势, 预期到 2050 年, 电力占终端消费比例大幅增加, 可再生能源占比达到 62%, 其中大部分是风电和光伏发电^[6]。

在可再生能源中, 风电、光伏等间歇式新能源的占比都比较高。由于风、光资源的随机性, 决定了风电和光伏发电不断变化并且不可调度。因此, 间歇式可再生能源的比例上升, 对大规模互联系统的特性会产生较大影响^[7-9]。为了在任何时候都保持供需平衡, 需要足够的灵活性资源平衡功率的波动^[10]。

目前, 传统火电厂提供了大部分灵活性, 为平衡大量间歇式可再生能源, 需要考虑其他形式的灵活性资源, 包括电网互联、储能、需求侧响应^[11-13]等。对含有大量间歇式可再生能源系统的灵活性进行分析时, 需要了解灵活性资源的需求、约束、灵活性类型, 然后就可以在此基础上进行灵活性资源的优化配置^[14-18]。对于灵活性的需求, 可以采用一定的指标表示^[19], 除了考虑经济性和功率平衡之外, 还需要在一定程度上考虑电力系统本身的固有特性^[9,20], 体现物理系统本身对灵活性资源配置的约束。

本文主要针对灵活性分析过程中, 考虑惯量作为系统物理约束, 分析惯量约束在灵活性分析中的考虑方法以及对灵活性资源的影响。

1 高比例可再生能源的特点及影响

风电、光伏等间歇式可再生能源具有随机性、波动性的特点。图 1 为某个国家连续 4 天风电出力较大和较小对应的各种发电出力曲线和负荷曲线^[21]。其中, 黑色曲线为负荷曲线, 最下面深色部分为风电出力曲线。

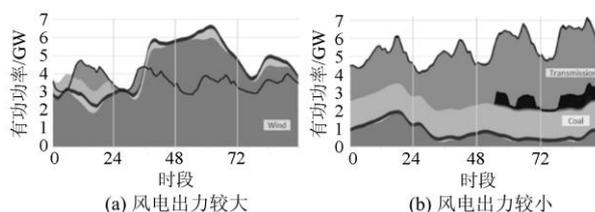


图 1 风电不同出力的各类型发电曲线

Fig. 1 Generator curve under high and low wind power

从图中可以看出, 在风电功率比较小时, 除了风电之外, 需要采用其他类型电源满足负荷需求; 当风电功率比较大时, 则主要采用风电供电, 一些时段的风电出力甚至超过了负荷。光伏与风电类似, 当出力比较大时, 也可能会超过负荷的需求。

为了更好掌握间歇式可再生能源对电力系统的影响, 定义灵活性需求指标, 采用“净负荷”的概念表示需要满足的波动需求^[21]。净负荷定义为负荷功率与间歇式可再生能源发电功率之差, 这部分需要采用可调度发电机组、联络线功率交换、储能等手段进行平衡。

对应图 1 的净负荷如图 2 所示。风小时, 净负荷曲线和负荷需求曲线基本类似; 风大时, 连续几天净负荷为负值。

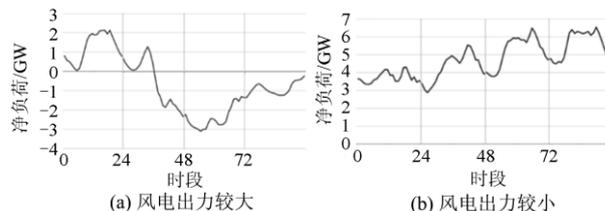


图 2 风电不同出力的净负荷曲线

Fig. 2 Residual load curve under high and low wind power

当风电和光伏的占比较高时, 会对传统电网的运行产生较大影响。随着风电和光伏比例的增加, 会减少传统发电机组的出力, 增加关停的可能性, 提高传统机组的运行成本; 由于风电和光伏边际成本接近于 0, 使得具有较低边际成本的机组决定市场价格, 总体上降低市场价格; 由于风电和光伏的波动性, 会增大联络线的功率波动, 需要更多的灵活性资源进行平衡, 并可能带来更多的弃风弃光问

题；由于风电和光伏一般不提供惯性，因此会降低系统的整体惯性，不利于系统的频率稳定。

2 考虑系统惯量的灵活性分析方法

高比例新能源一般会增大净负荷的波动性和随机性。一般主要从功率平衡的角度分析系统的灵活性需求，然后基于灵活性资源进行功率的平衡和优化。

由于短期的功率不平衡会影响到系统的频率，而系统惯量是影响系统频率变化的关键因素，反映了电力系统的物理约束。在新能源占比较高时，系统惯量可能会比较低，进而影响系统的频率特性。因此，在灵活性资源的平衡和优化中有必要考虑系统惯量的约束。

考虑系统惯量后对系统灵活性进行分析的基本过程如图 3 所示。

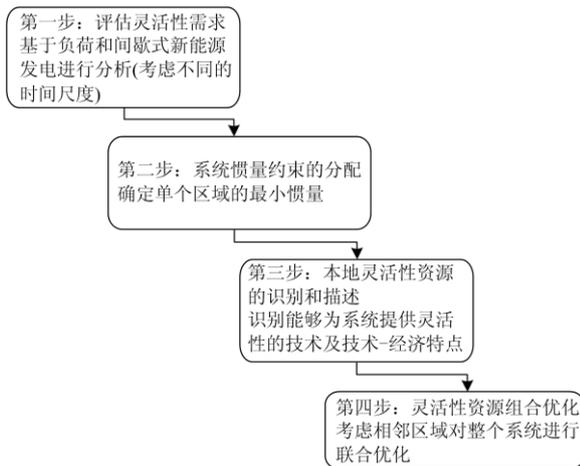


图 3 考虑惯量后的灵活性资源分析过程

Fig. 3 Analysis of flexible resource considering system inertia

如图所示，首先需要了解灵活性资源的需求情况、惯量的约束条件，然后分析可利用的灵活性资源，最后进行灵活性资源的综合优化^[22]，根据优化结果可以得到不同类型灵活性资源对灵活性需求的影响，为灵活性资源的运行调度和优化配置提供依据。

2.1 系统灵活性的需求指标

净负荷反映了系统负荷和风电、光伏等新能源的综合变化过程。对于净负荷的变化，不同时间尺度所表现的特性和对应的主要影响因素不同。小时内的波动，主要受到间歇式新能源随机波动的影响；一天内的波动，主要受到负荷曲线和光伏发电的影响；一周内的波动，主要受到工作日和休息日的负荷变化以及风电的周期波动的影响；一年内的波动，主要受到负荷、太阳能、风电季节性变化的影响。

因此，可以基于净负荷，考虑日、周、年等不同时间尺度计算灵活性需求，法国电力公司提出了灵活性需求的评价指标，包括日灵活性、周灵活性、年灵活性^[22]，评价不同时间尺度灵活性需求的大小。该方法并不是一个严格的方法，但比较形象、易于理解，具体如下：

1) 日灵活性

日灵活性定义为一天中每小时的净负荷与一天净负荷平均值的差值，如图 4 所示。

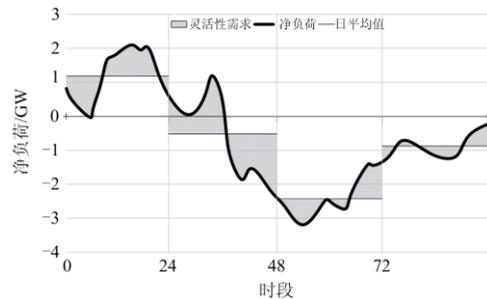


图 4 日灵活性示例

Fig. 4 Illustration of daily flexibility

日灵活性指标反映了一天净负荷的波动程度。一年所有天的日灵活性相加就是一年的日灵活性。

2) 周灵活性

周灵活性定义为一周中每天的净负荷平均值与一周净负荷平均值的差值，如图 5 所示。

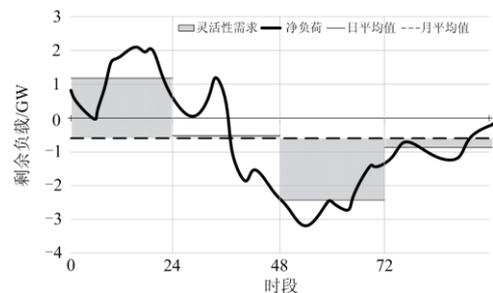


图 5 周灵活性示例

Fig. 5 Illustration of weekly flexibility

周灵活性指标反映了一周内净负荷的波动程度。一年所有周的周灵活性相加就是一年所需要的周灵活性需求。

3) 年灵活性

年灵活性定义为一年中每个月的净负荷平均值与一年净负荷平均值的差值。

上述三个不同时间尺度对应的灵活性指标，一方面反映了对灵活性资源的需求程度，另一方面从时间尺度上体现了对灵活性资源特性的要求。

2.2 系统灵活性的约束指标

新能源带来的波动，对系统频率变化特性会产

生一定影响, 特别是新能源占比较高的情况。系统惯量的大小反映了系统在功率变化后维持系统频率变化的能力, 较大的系统惯量有利于维持系统的频率稳定。

传统系统中的发电机绝大多数都是同步发电机, 系统的容量越大系统的惯量一般就越大; 而对于大规模新能源接入的电网, 大量发电设备都通过变频器与电网相连, 如果不采取特殊的控制措施, 对系统不提供惯性^[23], 可能会出现系统容量虽然比较大、但惯量并不大的情况。系统惯量相对大小会影响系统的频率变化率, 实际很多系统中都有基于系统频率变化的继电保护装置^[24], 因此在系统灵活性资源配置方面有必要将惯量作为约束条件, 以反映电力系统频率特性相关的约束。

电力系统惯量是与电网相连的所有同步电机的旋转质量。当同步发电机旋转设备受到的转矩不平衡时, 就会出现转速变化, 进而引起系统频率的变化。发电机的转速变化与转矩的关系为^[25]

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Delta T \quad (1)$$

式中: J 为发电机的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω 为发电机转速, rad/s ; ΔT 为不平衡转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$, 计算公式如式(2)。

$$\Delta T = T_m - T_e \quad (2)$$

式中: T_m 为发电机的机械转矩; T_e 为发电机的电磁转矩。

发电机惯量大小与旋转部分的质量和发电机的额定容量都有一定的关系, 不同大小的发电机组对应的惯量大小通常不一样。通常采用惯性常数表示发电机惯量的相对大小。惯性常数定义为旋转设备在额定转速时存储的能量与额定容量的比值, 如式(3)所示。

$$H = \frac{1}{2} J \omega^2 / VA_{\text{bse}} \quad (3)$$

式中: H 为惯性常数, s; VA_{bse} 为发电机额定容量, kVA。

根据式(3)和式(1), 可以得到

$$\frac{d\omega_{\text{p.u.}}}{dt} = \frac{1}{2H} \Delta T_{\text{p.u.}} \quad (4)$$

式中: $\omega_{\text{p.u.}}$ 为标么化后的发电机转速; $\Delta T_{\text{p.u.}}$ 为标么化后的不平衡转矩。

从式(4)可以看出, 发电机转速变化率的大小与惯性常数和转矩相对大小有关系。对于同样的转矩, 如果惯性常数越小, 则对应的转速变化率就越大。

对于一个同步系统, 整体的等效惯量可以根据

各发电设备的惯量计算, 如式(5)所示。

$$H_{\text{sys}} = \frac{\sum_{k=1}^N H_k VA_{k,\text{bse}}}{S_{\text{sys}}} \quad (5)$$

式中: N 为电源个数; H_k 为发电资源 k 的惯性常数, s; VA_{bse} 为发电资源 k 的额定容量, MVA; H_{sys} 为系统的等效惯性常数, s; S_{sys} 为系统容量, MVA, 等于所有发电容量之和。

$$S_{\text{sys}} = \sum_{k=1}^N VA_{k,\text{bse}} \quad (6)$$

系统的频率变化也与系统惯量和不平衡功率有直接关系, 式(4)对应系统频率变化可以写为

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2H_{\text{sys}} S_{\text{sys}}} f_N \quad (7)$$

式中: f_N 为额定频率, Hz; ΔP 为功率变化量, MW。系统惯量越大, 相同的功率变化对应的频率变化就越小。

考虑到系统中的最大频率变化率限制, 可以根据公式(7)计算系统的最小惯性常数限值。

$$H_{\text{sys,min}} = \frac{\Delta P_{\text{max}} / S_{\text{sys}}}{2 df_{\text{max}} / dt} f_N \quad (8)$$

式中: df_{max} / dt 为最大频率变化率, Hz/s; ΔP_{max} 为最大功率变化量, MW; $H_{\text{sys,min}}$ 为最小惯性常数, s。

在系统灵活性分析过程中, 可以根据实际运行状态动态计算系统的惯量和最小惯量限值, 将最小惯量限值作为系统灵活性资源配置的约束指标, 使任何时刻的系统惯量都大于最小惯量限值。

2.3 系统灵活性的可调资源

提供系统灵活性的资源可以从电源、电网、负荷、储能等不同角度考虑。

1) 电源侧包括所有的传统发电厂, 例如燃煤机组、水电机组、燃气机组等, 随着新能源比例的提升, 对燃气机组的需求逐渐增加。此外, 还包括风电、光伏等不可控电源的调节, 例如弃风、弃光等。

2) 电网侧则可以充分利用互联线路的功率调节能力, 实现不同区域之间的互补, 实现间歇式可再生能源在较大范围内的消纳。

3) 负荷侧可以利用具有一定响应能力的新型负荷。例如, 可以利用电动汽车实现有序充电, 利用一组具有需求侧响应能力的负荷实现负荷调节。

4) 储能是灵活性资源的重要组成部分, 包括抽水蓄能、电化学储能等多种类型, 从响应时间可以从秒级、分钟级到几个小时, 不同响应特性的储能可以满足不同的灵活性需求。

灵活性分析需要考虑当地可利用的灵活性资源。灵活性资源的可用性与所研究区域的实际资源情况有关系。还需要考虑临近区域的灵活性资源情况,考虑通过联络线进行资源互补的潜力。不同形式的灵活性资源在分析时需要考虑相关的技术经济参数,例如投资成本、运行成本、技术约束等。

2.4 系统灵活性的优化分析

对系统灵活性资源进行优化分析是在 2.3 节确定的可利用资源及其技术、经济参数的基础之上进行的优化过程,需要考虑 2.2 节提出的惯量约束指标,满足 2.1 节计算的灵活性需求指标。

该优化分析的目标函数可以采用投资或/和运行成本最小。由于实际系统都有各自的特点和具体需求,目标函数可能都有所差异。

在联合优化过程中,需要基于一段时间的数据序列进行优化,并考虑相邻区域的影响。由于不同天气条件会对间歇式新能源出力和负荷产生较大影响,因此在实际优化中需要考虑不同天气条件对应的不同场景。

3 算例分析

以某互联电网为例,对本文提出的灵活性资源优化及惯量约束的考虑方法进行分析。该互联电网包括 11 个分区,之间的连接关系如图 6 所示。

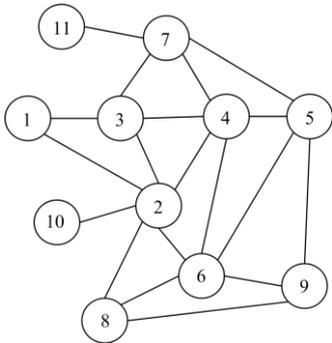


图 6 互联电网示意图

Fig. 6 Interconnection network diagram

整个系统的发电资源主要包含煤电、核电、燃气发电、水电等传统电源和风电、光伏等间歇式可再生能源。

首先计算灵活性需求指标和系统的等效惯量及最低约束指标,然后选择煤电、核电、燃气发电、水电以及联络线作为灵活性调节资源,最后以运行成本最低作为目标函数,最大化利用新能源,开展运行优化分析。结果可以给出不同时间尺度的灵活性需求、不同灵活性资源的贡献程度,为灵活性资源的配置提供参考。

3.1 计算系统的灵活性需求

将各地区的负荷减去风电、光伏的出力,得到净负荷。由于风电和光伏容量较大,净负荷的波动性基本上是增大的,分区 4 和 8 的净负荷在部分时刻甚至为负值,如图 7 所示。

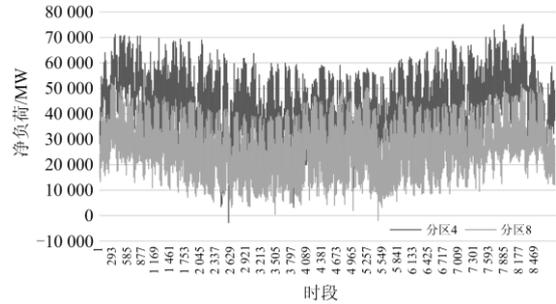


图 7 分区 4 和 8 的净负荷

Fig. 7 Residential load of zone 4 and 8

基于净负荷可以计算日灵活性、周灵活性、年灵活性指标,不同分区的结果如图 8 所示。

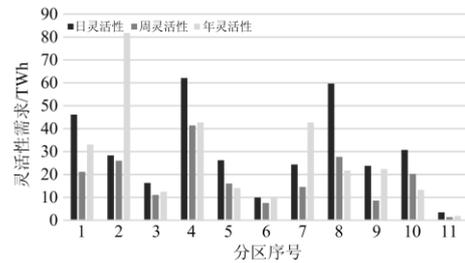


图 8 各分区净负荷的灵活性需求

Fig. 8 Flexibility requirement of residential net load

由于各个分区影响灵活性的主要因素不同,对应的日、周、年灵活性需求存在一定的差异,与负荷特性、风电和光伏的占比和分布、季节特性等因素有关系。

3.2 计算系统的惯量约束

系统惯量与运行状态有关系,随着运行状态的变化而变化,根据式(5)可以计算出每个时刻的系统惯量,根据式(8)计算系统最小惯量限值。

由于本算例采用的分区模型,其中不包含具体发电机组的详细信息,只能根据不同发电类型采用给定的惯量时间常数进行计算,本文采用欧洲电网规划数据中采用的典型惯性常数,具体如表 1 所示。

表 1 不同类型发电机组采用的惯性常数

Table 1 Inertia constant of different types of generator units

资源类型	惯性常数/s
煤电	5.5
核电	3.5
燃气发电	4.0
水电	7.0

以分区 8 为例, 假定最大功率变化量为 1 000 MW, 最大频率变化率为 0.5 Hz/s, 基于不考虑惯量约束的优化结果, 计算的系统惯量和最低惯量限值如图 9 所示。

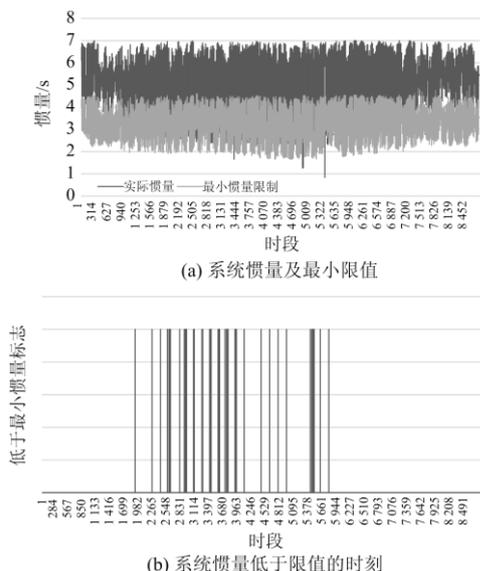


图 9 分区 8 的惯量及最小惯量限值

Fig. 9 System inertia and minimum limit of zone 8

从图中可以看出, 最小惯量限值也随着运行状态的变化而变化, 在部分时段, 系统惯量已经低于最小惯量限值。如果考虑最小惯量约束, 系统运行状态优化结果会有所变化。

3.3 系统运行的优化分析

系统的优化分析过程中, 考虑的灵活性资源包括煤电、核电、燃气发电、水电以及联络线, 以成本最低作为目标函数, 进行优化计算。

成本可能包括投资成本、运维成本、燃料成本、二氧化碳成本等多方面。为了简单, 本算例仅考虑边际成本(主要考虑了燃料成本和二氧化碳成本)。上述不同资源采用的边际成本如表 2 所示。

表 2 不同资源的边际成本

Table 2 Marginal cost of different types of resources

资源类型	边际成本/(\$/MW)
煤电	30.80
核电	21.63
燃气发电	41.68
水电	0.00
互联线路	0.00

在不考虑惯量影响的情况下, 整个互联系统按照经济最优的方式安排发电机出力, 并考虑互联线路的功率限值。每个分区的灵活性需求一方面由本区域的发电资源承担, 另一方面通过联络线由相邻分区的发电资源承担。以分区 8 为例, 其中某一段

连续 4 天的发电和联络线功率情况如图 10 所示。

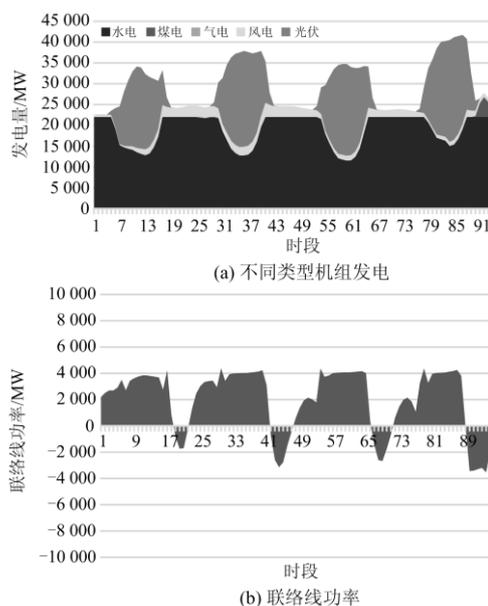


图 10 分区 8 某连续 4 天的发电和联络线功率

Fig. 10 Generation and interconnection power of 4 days of zone 8

从图中可以看出, 光伏占比较高, 在白天除了用于满足高峰负荷的需要之外, 还通过联络线输出, 晚上高峰负荷时, 则需要增开部分水电、煤电等, 并通过联络线输入部分电量。

系统惯量与实际的开机情况有直接关系, 是动态变化的。对应这 4 天分区 8 的系统惯量和最低惯量限值如图 11 所示。

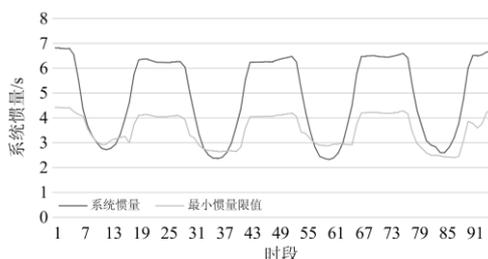


图 11 分区 8 某连续 4 天的惯量和最小惯量

Fig. 11 Inertia and limit of 4 days of zone 8

如图所示, 白天光伏发电功率最大的时刻, 惯量最低, 而晚上高峰负荷时刻, 增开了部分火电和燃气发电, 惯量最大。从图 9 可以看出, 白天光伏出力最大时, 传统发电机组只有水电, 占总发电量的比例低于 40%。因此, 与都采用传统机组供电的情况相比, 惯量降低比较多。

另外, 在部分时段, 系统惯量低于最小限值, 如果考虑惯量的约束, 需要提高水电、火电等传统机组的发电量, 而多余的风电、光伏可以通过联络线向外输送, 或者弃风弃光。考虑惯量约束后的机

组发电情况如图 12 所示。

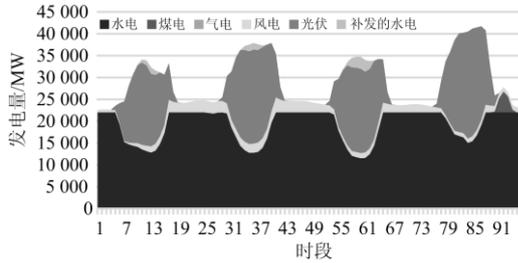


图 12 分区 8 某连续 4 天考虑惯量后的发电量

Fig. 12 Generation after considering the inertia limit 4 days of zone 8

从图中可以看出，考虑最小惯量限值后，在光伏功率较高时刻增加了部分水电机组出力。如果系统惯量低于最低惯量较多，会对不同类型灵活性资源的发电产生较大影响。

基于优化结果，除了分析不同类型灵活性资源的功率变化情况之外，还可以分析对不同灵活性需求指标的贡献程度。图 13 显示了分区 8 不同灵活性资源对日灵活性的贡献比例。

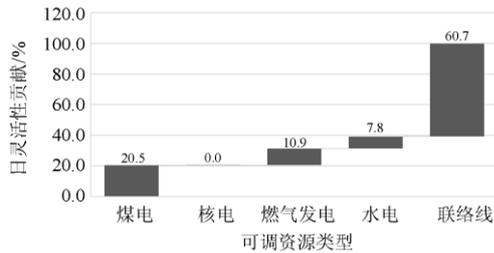


图 13 分区 8 不同灵活性资源的贡献

Fig. 13 Contribution of different flexible source of zone 8

可以看出，联络线提供的灵活性较高，达到 60%，然后是煤电、燃气发电等。对于周、年灵活性，各灵活性资源贡献与日灵活性类似。说明对于分区 8，联络线在功率调节中发挥了关键的作用，需要加强联络线的进一步投资。

当然，不同分区的灵活性资源不同，对灵活性的贡献也各有差异，有的甚至增加了单个分区的灵活性需求，但通过联络线为相邻分区提供了支撑，总体上降低了系统的灵活性需求。

前面针对本算例的分析，介绍了灵活性资源的计算、优化计算以及惯量的影响。需要说明的是，本算例为了说明问题，采用了一些比较简单的计算条件，而实际电网涉及的因素会比较多，情况会更加复杂，但是基本思路是一样的。

4 结论

本文主要针对高比例可再生能源系统灵活性

分析时系统惯量的计算及应用方法进行了研究，主要结论如下：

1) 随着风电、光伏等新能源的大规模接入，系统惯量呈现逐渐降低的趋势，对系统的频率稳定性产生较大影响，有必要在灵活性分析中将系统惯量作为约束指标。

2) 可以根据系统中所有发电设备的惯性常数、额定容量采用加权平均的方法计算系统惯量，然后根据系统允许的最大频率变化率、可能的最大功率变化量动态计算系统最低惯性限值。

3) 在灵活性资源优化过程中，将系统最低惯量作为约束条件，在系统惯量低于最低限值时，调整灵活性资源，增大系统惯量，满足惯量的约束条件。考虑最低惯量约束后可能会增大同步发电机类型机组的出力。

总之，在大量新能源接入系统导致低惯量的背景下，本文提出的系统惯量约束指标及其在灵活性分析过程中的应用方法，有利于在资源配置中更好地考虑系统频率特性的影响。

参考文献

[1] 袁伟, 王彩霞, 叶小宁. 国内外新能源发展现状、市场趋势对比分析[EB/OL]. (2020)[2020-06-22]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20200622/1083008.shtml>.
YUAN Wei, WANG Caixiao, YE Xiaoning. Comparative analysis of new energy development status and market trends at home and abroad[EB/OL]. (2020)[2020-06-22]. <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20200622/1083008.shtml>.

[2] BOSSAVY A, BOSSMANN T, FOURNIÉ L, et al. Optimal flexibility portfolios for a high-RES 2050 scenario[R]. European Commission, 2018.

[3] CAPROS P, DE VITA A, PAROUSSOS L, et al. EU reference scenario 2016 energy, transport and GHG emissions trends to 2050[R]. European Commission, 2016.

[4] 孙一琳. 2020 年美国可再生能源发电发展展望[EB/OL]. (2020) [2020-04-04]. <https://news.solarbe.com/202004/22/324129.html>.
SUN Yilin. Prospects for renewable energy generation in the US in 2020[EB/OL]. (2020) [2020-04-04]. <https://news.solarbe.com/202004/22/324129.html>.

[5] 国网能源院有限公司. 能源与电力分析年度报告系列 2020 中国新能源发电分析报告[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.

[6] 国家发展和改革委员会能源研究所. 中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨路线研究[R]. 2015.
National Development and Reform Commission Energy Research Institute. China 2050 High Proportion Renewable Energy Development Scenario and Route Research[R]. 2015.

[7] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.

- LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(12): 177-187.
- [8] 石玉东, 刘晋源, 徐松, 等. 考虑时序特性的配电网风-光-储随机规划模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 24-32.
- SHI Yudong, LIU Jinyuan, XU Song, et al. Integrated wind-photovoltaic-storage stochastic planning model considering time-varying characteristics in distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 24-32.
- [9] 王博, 杨德友, 蔡国伟. 高比例新能源接入下电力系统惯量相关问题研究综述[J]. *电网技术*, 2020, 44(8): 2998-3006.
- WANG Bo, YANG Deyou, CAI Guowei. Review of research on power system inertia related issues in the context of high penetration of renewable power generation[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(8): 2998-3006.
- [10] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 147-157.
- LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147-157.
- [11] 程杉, 陈梓铭, 徐康仪, 等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 15-21.
- CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 15-21.
- [12] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [13] 应飞祥, 徐天奇, 李琰, 等. 含电动汽车充电站商业型虚拟电厂的日前调度优化策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 92-100.
- YING Feixiang, XU Tianqi, LI Yan, et al. Research on day-to-day scheduling optimization strategy of a commercial virtual power plant with an electric vehicle charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 92-100.
- [14] MOHANDS B, MOURSI M S E, HATZIARGYRIOU N, et al. A review of power system flexibility with high penetration of renewables[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 3140-3155.
- [15] DEGHAN S, AMJADY N, ARISTIDOU P. A robust coordinated expansion planning model for wind farm-integrated power systems with flexibility sources using affine policies[J]. *IEEE Systems Journal*, 2020, 14(3): 4110-4118.
- [16] DIEGO A, GERMÁN M, SONJA W. Power-based generation expansion planning for flexibility requirements[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(3): 2012-2023.
- [17] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 73-80.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 73-80.
- [18] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰. 需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(9): 1973-1984.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(9): 1973-1984.
- [19] 葛朝晖, 张倩茅, 齐晓光, 等. 考虑灵活性需求的可再生能源出力特性指标体系[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(7): 30-37.
- GE Zhaohui, ZHANG Qianmao, QI Xiaoguang, et al. Index system for renewable energy output characteristics considering flexible demand[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(7): 30-37.
- [20] NGUYEN H T, YANG Guangya, NIELSEN A H, et al. Combination of synchronous condenser and synthetic inertia for frequency stability enhancement in low-inertia systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, 10(3): 997-1005.
- [21] BOSSMANN T, BARBERI P, FOURNIÉ L. Effect of high shares of renewables on power systems[R]. European Commission, 2018.
- [22] ANDREY C, ATTARD P, BARDET R, et al. Design of flexibility portfolios at Member State level to facilitate a cost-efficient integration of high shares of renewables[R]. European Commission, 2017.
- [23] CHOWN G A, WRIGHT J G, HEERDEN R V, et al. System inertia and rate of change of frequency with increasing non-synchronous renewable energy penetration[J]. *Cigre Science & Engineering*, 2018.
- [24] Rate of change of frequency (RoCoF) withstand capability[R]. European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2017.
- [25] KUNDUR P. *Power system stability and control*[M]. New York: McGraw-hill, 1994.

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2021-01-12

作者简介:

江 涵(1984—), 男, 博士, 高工, 研究方向为电力系统规划。E-mail: han-jiang@geidco.org

(编辑 葛艳娜)