

高比例可再生能源并网的 电力系统灵活性评价与平衡机理

鲁宗相, 李海波, 乔颖

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Flexibility Evaluation and Supply/Demand Balance Principle of Power System With High-penetration Renewable Electricity

LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering,
Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: With the integration of high shares of variable renewable energy (VRE), both increasing uncertainty of VRE and load make it difficult to envelope the total uncertainty by increasing reserve in a technical or economic way and urgently request to establish a new flexibility balance rules. This paper proposed the definition of power system flexibility and its characters, then introduced the universal mathematical description of power system multiple time scale flexibility “supply/demand” balance, also the evaluation indices for it. Based on the flexibility adequacy model, the flexible promotion options were divided into 3 types according to their action mechanism. Finally, case studies based on practical data from one power grid in northern China were conducted to verify the proposed method and indices. The results show that the proposed indices have obvious linear relationship with system security and curtailment so that the balance principle can be applied in the optimal flexibility planning in the complex “Generation-Grid-Load-Storage” scenario.

KEY WORDS: high-penetration renewable electricity; flexibility; supply/demand balance principle; quantitative assessment; non-sequential production simulation

摘要: 高比例可再生能源并网的电力系统中, 波动电源和负荷不确定性双重叠加, 采用增加备用应对不确定性的模式在技术和经济上均难以为继, 亟待建立一种新的灵活性平衡机

制。该文首先给出了电力系统灵活性的概念及其特征, 提出了多时间尺度灵活性供给-需求平衡的通用数学方法和灵活性度量指标, 建立灵活性裕度的概率模型, 阐明曲线平移类、曲线整形类和综合类等3种类型灵活性增加途径; 最后, 通过我国北方某大型风电基地实际数据, 以调峰灵活性为例, 对该文提出的平衡机理和指标体系进行了验证和测算。算例表明灵活性指标能够与系统负荷损失风险、新能源限电建立线性关联, 依据灵活性平衡机理可实现源-网-荷-储复杂场景下的综合灵活性优化。

关键词: 高比例可再生能源电力; 灵活性; 供需平衡机理; 定量评价; 非时序生产模拟

0 引言

高比例可再生能源发电成为全球广泛关注的未来电力系统场景。欧洲^[1]、美国^[2]和中国^[3]分别提出2050年实现100%、80%、60%可再生能源电力系统蓝图。全新场景下, 电力系统特征发生了显著变化, 随机波动的风能和太阳能成为主力电源, 基本取消“基荷”发电厂, 常规火电机组在日内启停, 并通过水电厂、燃气电厂、储能等灵活资源调节实现对可再生能源随机波动性的互补^[4], 灵活性成为规划和运行关注的核心问题。

然而, 电力系统的安全、可靠、灵活、经济四个基本特性中, 灵活性一直难于量化, 例如, 评价电站主接线灵活性, 往往采用操作方便、调度方便、扩建方便、便于检修等定性描述方式。高比例可再生能源接入电力系统后, 灵活性成为系统运行特性的核心和关键, 其定量评价成为热点^[5-8], 目前的研

基金项目: 国家重点研发计划支持项目(2016YFB0900101); 国家自然科学基金项目(51677099); 国家电网公司科技项目(XTB17201500037)。

Project Supported by The National Key Research and Development Program of China (2016YFB0900101); National Natural Science Foundation of China (51677099); State Grid Corporation technology project (XTB17201500037).

究大致可分为2类:

1) 静态直接评价法,采用类似专家评价的方法对系统灵活性供需进行评价。文献[9]采用“灵活性雷达图(flexibility chart)”刻画系统灵活性,具体以各类灵活性资源(水电厂、热电联产、抽蓄等)及灵活性需求(负荷、风电等)装机容量百分比的雷达图表示。IEA提出包含电网区域范围、网架强度、可调度灵活资源等因素的打分法^[10],针对常规电厂、储能设备、需求侧响应及电网四类灵活性资源建立评估方法^[4]。然而,这些评价指标基本都是在通用规模指标基础上的二次表征,无法反映系统灵活性供需平衡的物理机理,且静态评价结果偏保守。

2) 动态仿真评价法,设定若干场景进行生产模拟,根据是否存在失负荷或者可再生能源限电判断系统灵活性大小。文献[11]基于机组灵活性指标规划待建机组,促进新能源消纳。文献[12-13]获取机组出力序列并将其转化为灵活性供给概率分布,并与灵活性需求序列对比判定系统灵活性大小。文献[14]建立了1h内时间尺度下系统灵活性需求及供给模型,并用在短期运行规划中分析系统灵活性供需平衡。文献[15]提出灵活性需求和供给的区间形式,对比判断其充裕性。文献[16]从爬坡、功率和能量3个维度提出了灵活性指标。文献[17]提出了衡量系统爬坡能力是否满足需求的指标。

上述灵活性研究着眼于解决新能源消纳等工程目标,仍然存在若干基础理论问题没理清。基本特性方面,电力系统灵活性具有方向性、概率性、多时空尺度特性、状态相依性和双向转化特征,现有研究仅就其中部分特性展开,难以体现其多特性耦合的复杂特点。数学模型方面,我们不仅需要了解某时某刻系统灵活性是否充裕,更关注一段时间内系统灵活性充裕的概率,需要搭建多时空尺度、不同场景的概率性灵活性评价的统一数学框架。评价指标方面,现有评价指标与可再生能源消纳水平、系统安全性之间还有待建立因果逻辑。因此,构建逻辑严谨的电力系统灵活性供需平衡机理,是高比例可再生能源电力系统规划和运行迫切需要解决的关键基础问题。

随着并网可再生能源比例增加,电力系统不确定性增加,电力系统的灵活性平衡方法亦随之变化。低比例时(低于净负荷波动10%),可通过配置充裕的备用容量(大于波动量最大值)来保障电力平衡。这种电源跟踪负荷波动的运行规则是电力系统

长期以来保障运行安全的基本方法,其实质是将不确定性问题边界化处理,只有不确定性很小的场景下才具有工程可行性。而在高比例可再生能源系统中,源荷双波动源导致灵活性需求剧增,而部分常规电源被可再生能源替代进一步减少了灵活电源,单纯靠备用电源保障系统安全成本昂贵且不可行,因此必须充分挖掘源网荷各个环节的调节潜力参与平衡,并还原到不确定性分析方法,建立灵活性需求与供给的平衡,这是一种源网荷互动参与的新平衡原理。

本文围绕高比例可再生能源的电力系统灵活性供需平衡机理开展,内容组织如下:首先给出电力系统灵活性概念、特征及关键影响因素,从数学角度对电力系统灵活性资源/需求平衡机理进行统一描述,提出平衡判据及灵活性度量指标;然后提出电力系统多时间尺度灵活性供给、需求及裕量评估模型;从对资源、需求作用机理方面,提出了曲线平移类、曲线整形类和综合类3种类型提高灵活性的方法;最后,基于我国北方某大型新能源基地的历史和规划数据,对本文提出的灵活性评价指标和平衡机理进行了验证和测算。

1 电力系统灵活性平衡的数学描述

1.1 电力系统灵活性的概念

对电力系统灵活性定义如下^[8,18-19]:在所关注时间尺度的有功平衡中,电力系统通过优化调配各类可用资源,以一定的成本适应发电、电网及负荷随机变化的能力。有些语境下,系统灵活性也指灵活性供给相对其需求的充裕程度。

电力系统灵活性有如下5个特征:

特征1:方向性。系统存在需要向上或向下调节功率的情况,即灵活性具有方向性。

特征2:多时空特性。电力系统需求在不同时间尺度的特性是变化的,而不同灵活性资源的响应能力也与时间具有较强相关性。例如,按时间尺度划分,可分为调频($\leq 15\text{min}$)、爬坡($15\text{min}\sim 4\text{h}$)、调峰(24h)等的灵活性。在空间尺度上,受资源分布和传输条件影响,灵活性资源并不能在整个系统中自由流动。

特征3:状态相依性。电力系统灵活性供给和需求均与系统运行状态有较强的相依特性,供给方面,常规机组的调节特性与其出力水平有关,而储能的灵活调节能力与其历史状态有关;灵活性需求

则与所处的负荷水平相关。

特征 4：双向转化性。未来电力系统灵活性的需求与供给在一定条件下都可以相互转化。负荷的波动性和不确定性本身是灵活性需求，但通过需求侧响应可反过来为系统提供灵活性；可再生能源既对系统提出了较大的灵活性需求，但弃风/弃光手段也为系统提供一定的灵活调节资源。

特征 5：概率特性。电力系统的不确定性，需要用概率方法构建其模型，相应的灵活性也必须在概率方法框架下进行评估和分析。

1.2 电力系统灵活性平衡的改变

灵活性平衡是指系统在任何时刻、任一时间尺度下及任何方向上，各类资源的灵活性供给相对于灵活性需求的充裕程度超过允许水平。

从电源跟踪负荷的单向模式变成源-网-荷-储互动方式，是传统电力平衡扩展到灵活性平衡的关键差别。这种灵活性平衡，多数场景下电源匹配负荷，在特定时段也可能是负荷调整来匹配电源的波动，即需求响应(demand response, DR)机制。两种平衡机制的对比如表 1 所示。

电力系统灵活性平衡存在 3 个关键要素：灵活性资源、需求及支撑平台，如图 1 所示^[20]。灵活性需求源自负荷及可再生能源波动性和不确定性、设备强迫停运等。灵活性资源包括所有能够应对波动性与不确定性的调节手段，可来自供给侧、储能及

需求侧。供给侧主要靠常规电源实现灵活性调节，可再生能源在局部时段也可通过出力调节和限电提供灵活性；储能通过对电能供需时间上的平移提供灵活性。支撑平台包括电网和电力市场，电网利用空间分布特性实现灵活性需求平移，是物理层面的支持平台；而市场则是利用价格杠杆调节供需关系，降低灵活性需求或增加灵活性供给，是运营管理层面的支持平台。

1.3 高比例可再生能源并网电力系统灵活性平衡的一般性数学描述

采用传统电源跟踪净负荷并预留备用的“包络”模式考虑系统灵活性的原理如式(1)和图 2 所示，常规机组的上调峰和上爬坡能力需分别大于等于净负荷及其爬坡。

$$\begin{cases} \sum_i P_{\max i} \geq P_{nL} \\ \sum_i \frac{dP_{\max i}}{dt} \geq \frac{dP_{nL}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{\max,i}$ 表示机组 i 的调峰容量； P_{nL} 表示净负荷的总调峰需求。

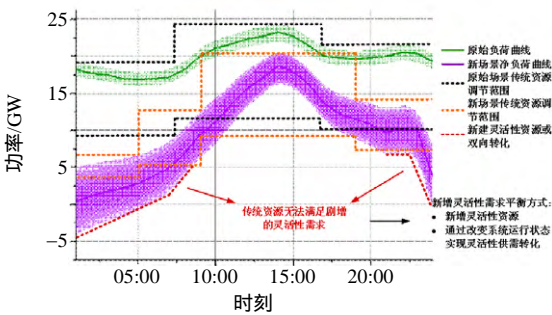


图 2 电力系统灵活性资源供给、需求平衡示意图
Fig. 2 Diagram of power system flexibility resource and demand balance

高比例可再生能源系统有如下几个特征：1) 可再生能源接入装机容量及电量占比均很高；2) 系统含有多类可再生能源，如风电、太阳能、水电等；3) 系统不确定性较高。

以高比例风电接入为例进行说明，图 2 中绿色和紫色曲线分别表示原始负荷和新场景(高比例可再生能源系统)的净负荷(负荷与新能源出力之差)曲线，阴影部分代表其不确定性范围。可以看出，高比例可再生能源接入后，主要有 3 点变化：1) 系统灵活性需求大幅增加，且与可再生能源接入比例强相关；2) 传统电源被可再生能源替代，大大降低了常规灵活性资源的容量；3) 传统电力平衡方

表 1 两种平衡机制对比表

Tab. 1 The comparison between two balance principles	
属性	电力平衡
平衡需求	负荷及可再生能源的波动性及不确定性综合而得的“净负荷”
平衡资源	灵活电源(主要是依靠常规源-网-荷-储在特定时段均可作为源机组)
作用机制	双向互动作用，多数场景源匹配荷，特定场景荷匹配源(需求响应机制)
平衡点	电源出力约等于负荷需求

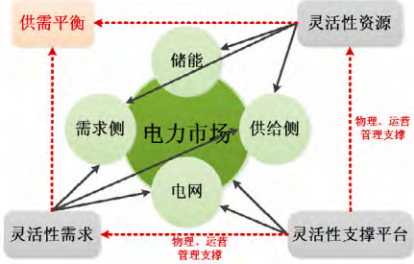


图 1 电力系统灵活性资源、需求及支撑平台
Fig. 1 System flexibility sources, demand and enablers

式已经无法实现对净负荷的包络,系统在局部时段出现了灵活性不足现象,需要充分挖掘其他灵活性资源潜力,并调控有条件的灵活性需求转化为供给。

高比例可再生能源系统中,灵活性的供给和需求均服从特定分布的随机变量。引入累积概率或概率密度进行描述,则灵活性充足的判据为:系统灵活性资源供给能力小于灵活性需求的概率(或风险)低于给定阈值。

定义 X 和 Y 分别为系统灵活性总供给和总需求的随机变量, $Z = X - Y$ 为灵活性裕度变量,则灵活性平衡的确定性判据式(1)转化为更为一般的概率形式(2):

$$\Pr(Z \leq 0) = \Pr(X \leq Y) = \Pr\left(\sum_{i \in S} X_i \leq \sum_{i \in D} Y_i\right) \leq \theta \quad (2)$$

式中: θ 表示充裕水平; S 表示灵活性供给源的集合; X_i 表示第 i 个源的供给量; D 表示灵活性需求的集合; Y_i 表示第 i 个需求量。

式(2)的物理意义如图3所示, $\Pr(X^-)$ 、 $\Pr(X^+)$ 分别代表上调、下调灵活性供给, $\Pr(Y)$ 代表灵活性需求。在图中黄色阴影区域,灵活性供给有可能小于需求,对应的后果为失负荷和可再生能源限电。阴影面积越小,系统的灵活性越好。

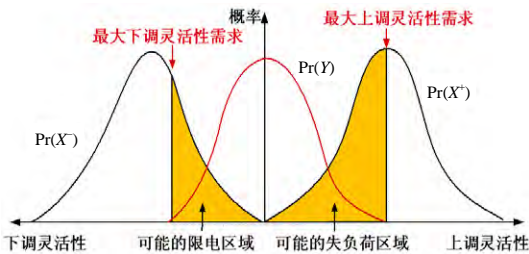


图3 系统灵活性供给与需求概率分布示意图

Fig. 3 Diagram of probability distribution for system flexibility source and demand

考虑灵活性的特性,式(2)的一般的形式:

$$\Pr(Z^A; \tau) = \sum_{C_i \in S_C} \Pr(C_i) \Pr(Z^A | C_i; \tau) \leq \theta, \forall \tau \quad (3)$$

式中: A 和 τ 为参数项; $A \in \{+, -\}$ 表示上调或下调灵活性; τ 通常取 15min、4h 和 24h 等,分别表示调频、爬坡和调峰等研究对应的时间尺度;灵活性系统与状态 C_i 有关(C_i 可定义为负荷水平); S_C 为可枚举状态的集合。

式(2)可采取概率密度函数形式(4)~(5),根据概率卷积运算基本原理,灵活性随机变量的加减运算分别用卷积和与卷积差表示:

$$\varphi_M = \varphi_X \ominus \varphi_Y = \left(\bigoplus_{i \in S} \varphi_{X_i} \right) \ominus \left(\bigoplus_{i \in D} \varphi_{Y_i} \right) \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^0 \varphi_M(z) dz \leq \theta \quad (5)$$

式中: φ_M 表示系统灵活性裕量的概率密度函数; φ_X 、 φ_Y 分别代表灵活性供给 X 与需求 Y 概率密度函数; \oplus/\ominus 分别为卷积/卷积差运算。类似的,式(3)的概率密度形式如式(6),式中 C_{\min} 和 C_{\max} 分别表示状态上下限,积分顺序可以交换。

$$\int_{C_{\min}}^{C_{\max}} \int_{-\infty}^0 \varphi_M^A(z | C; \tau) dz dC \leq \theta \quad (6)$$

1.4 电力系统灵活性度量指标

已有的系统灵活性指标^[11-17]侧重度量供应侧的灵活性电源规模,无法衡量灵活性供需二元关系失衡的后果。本文将提出一套灵活性裕量的评价指标,分别如图4和表2所示。

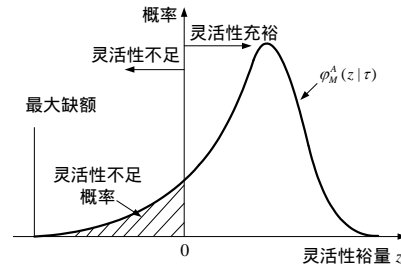


图4 系统灵活性度量指标的物理含义

Fig. 4 Physical meanings of system flexibility indices

表2 电力系统灵活性度量指标

Tab. 2 Power system flexibility evaluation indices

指标名称	计算公式
灵活性裕量分布	$\varphi_M^A(z \tau) = \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} f(C) \varphi_M^A(z C;\tau) dC$
灵活性不足概率	$\text{FNS}^A(\tau) = \int_{-\infty}^0 \varphi_M^A(z \tau) dz$
灵活性不足期望	$\text{EFNS}_F^A = \int_{-\infty}^0 (-z) \varphi_M^A(z \tau) dz$
给定阈值下的灵活性缺额值	$\text{FDS}_\beta^A(\tau) = \max[\alpha: \int_{-\infty}^\alpha (-z) \varphi_M^A(z \tau) dz \leq \beta]$

图4中灵活性裕量的概率分布函数 φ_M 在左/右半平面对应灵活性不足/充裕的情形。计算 φ_M 的相关数值特征,即可构建起灵活性与可再生能源消纳水平、负荷损失风险之间的定量关系。灵活性不足概率指标物理含义为研究时段内灵活性不足时间与总时间的比值,灵活性不足期望指标与弃风/弃光电量或失负荷量成正比,给定阈值下的灵活性缺额值反映系统达到给定灵活性水平需要增加的理想灵活性资源值。

2 电力系统多时间尺度灵活性度量模型

本节介绍电力系统灵活性评估模型,核心是

式(3)或(4)的具体表达式及计算方法。在给定待评估时间尺度 τ 和电网区域后, 评估分为 4 个步骤:

第 1 步基于负荷状态 C_i 划分, 获取各类灵活性资源出力的概率分布 $\Pr(X_i|C_i)$ 。该分布可由系统时序生产模拟结果统计, 或直接采用非时序生产模拟方法^[21]得到, 详细模型可参阅文献[22]。

第 2 步获取单个灵活性资源在各出力水平的灵活性供给能力分布, 并根据卷积和运算得到系统在各负荷水平下灵活性总供给的全概率分布。

第 3 步根据预测信息, 形成负荷与可再生能源等不确定性因素的概率分布函数。

第 4 步, 将系统灵活性供给与需求概率分布进行卷积计算, 得到灵活性裕量概率分布, 并利用表 2 公式计算系统灵活性度量指标。

2.1 电力系统多时间尺度灵活性供给模型

本节以常规机组为例探讨灵活性资源供给的建模方法。常规机组灵活性具有多时间尺度和状态依赖的特性, 如图 5 所示(为体现各个变量的耦合关系, 图 5 采用了共用坐标轴的组合图方式, 后续图 6 类似)。

右半轴表示常规机组在某一出力水平下, 其灵活性供给能力与时间尺度的关系, 曲线表明随着时间尺度的增加, 上/下调灵活性供给增加, 但受到调节能力限制, 最后稳定在某一固定水平, 此外如果时间尺度超过机组最小运行时间, 机组还可通过关机获取额外的下调灵活性。左半轴以上调灵活性为例, 展示了常规机组在某一时间尺度 τ 下, 其灵活性供给能力与其出力关系的函数示意图。机组出力轴的可行域为 $[P_{gmin}, P_{gmax}]$, 在出力水平较低范围内, 其灵活性调节能力受到爬坡能力约束, 为一恒定值。随着出力水平的增加, 当上调空间低于爬坡

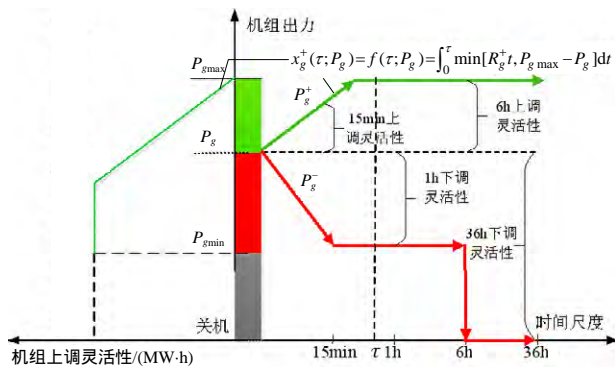


图 5 常规机组多时间尺度灵活性与出力关系示意图

Fig. 5 Diagram of the relationship between the multi-timescale flexibility and active power of generators

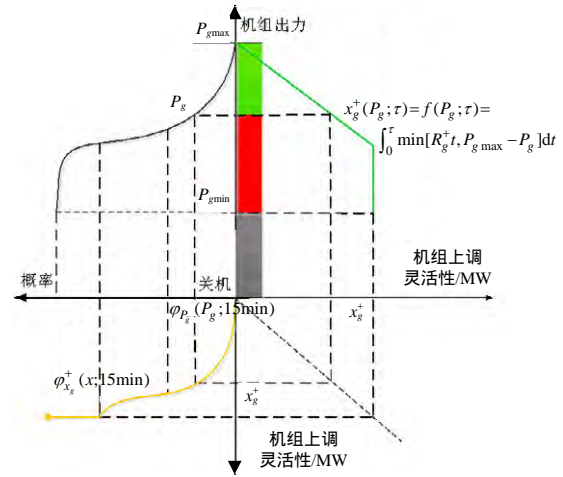


图 6 常规机组出力概率与灵活性概率分布转化示意图

Fig. 6 Diagram of the relationship between the PDF of the flexibility and active power of generators

能力时, 其灵活性供给能力受到调节能力限制, 即灵活性与机组出力关系呈现递减趋势。

例如, 图 5 中时间尺度 τ 下的常规机组上调灵活性与出力水平的函数关系如式(7)所示。

$$x_g^+(\tau; P_g) = f(\tau; P_g) = \int_0^\tau \min[R_g^+ t, P_{gmax} - P_g] dt \quad (7)$$

式中: x_g^+ 代表机组上调灵活性; R_g^+ 为机组的上爬坡率; P_g 、 P_{gmax} 分别为机组出力和出力上限。

一旦给定时间尺度 τ , 机组的灵活性仅与出力状态有关 $f(P_g; \tau) = f(P_g)$, 为一确定数。若获得该机组出力状态的概率分布 $\varphi_{P_g}(u)$, 则可获取该机组上调灵活性供给的概率分布:

$$\varphi_{x_g^+}(x; \tau) = \varphi_{P_g}(u; \tau) = \varphi_{P_g}(f^{-1}(u; \tau)) \quad (8)$$

式中: $\varphi_{x_g^+}$ 分别代表机组上调灵活性的概率分布; x 和 u 为相应的随机变量; f 含义同式(7)。

图 6 以机组的 15min 上调为例展示了式(8)的转化过程。第二象限曲线为机组出力累积概率分布曲线, 选定其中某一点, 横坐标为机组出力, 通过右半轴的灵活性-出力关系(第一象限曲线)映射到下半轴, 可得到对应灵活性概率分布的横坐标点, 而纵坐标值取原始点的纵坐标值。逐点映射, 即可得到常规机组灵活性供给的累积概率分布函数, 如图中第三象限曲线所示。

此外, 互联电网、储能及负荷侧的灵活性供给建模方式与常规机组类似。首先计算该资源在各状态下的多时间尺度灵活性供给能力, 然后基于其状态的概率分布函数, 将其转化为灵活性供给能力的概率分布函数, 不同类型资源多时间尺度灵活性供

给模型可抽象为式(9)：

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_{X_{\kappa}}^+(x; \tau) = \varphi_{P_{\kappa}}(f_{\kappa}^{-1}(u; \tau)), \quad \kappa \in \{g, net, st, dr\} \\ \text{s.t.} \quad f_g(\tau; P_g) = \int_0^{\tau} \min[R_g^+ t, P_{g\max} - P_g] dt \\ f_{net}(\tau; P_{net}) = \int_0^{\tau} \min[R_{net}^+ t, P_{net\max}^{\text{net}} - P_{net}] dt \\ f_{st}(\tau; P_{st}, E_{st}) = \min[(P_{st\max} - P_{st})\tau, E_{st\max} - E_{st}] \\ f_{dr}(\tau; P_l) = \min[k_l P_l \tau, E_{l\max}] \end{array} \right. \quad (9)$$

式中： κ 代表灵活性资源类型； g 、 net 、 st 、 dr 分别代表电源、电网、储能及需求侧灵活性资源； P_{net}^{net} 、 P_{net} 、 R_{net}^+ 分别表示互联电网额定功率、实际功率及最大向上调节速率， P_{st} 、 E_{st} 、 $P_{st\max}$ 、 $E_{st\max}$ 分别表示储能出力、剩余电量、额定功率及电量； k_l 和 $E_{l\max}$ 分别表示可中断负荷比例和最大切负荷电量。

2.2 电力系统多时间尺度灵活性需求模型

电力系统灵活性需求主要源于负荷与波动性可再生能源(风电/光伏等)的波动性和不确定性，与时间尺度和状态相关。

设负荷波动量服从条件分布 $\varphi_{Y,L}(y|P_L; \tau)$ ， P_L 为负荷值(状态)。该分布可通过对历史负荷时序数据统计负荷为 τ 尺度下波动量得到。

$$\varphi_{Y,L}(y|\tau) = \int_{P_{L\min}}^{P_{L\max}} \Pr(P_L) \varphi_{Y,L}(y|P_L; \tau) dP_L \quad (10)$$

同理，可以得到新能源波动和不确定性引起的灵活性需求概率分布 $\varphi_{Y, re}(y|\tau)$ ，系统总的灵活性需求为两者的概率卷积。

2.3 考虑元件相关性的系统级灵活性裕量模型

实际系统中某些灵活性资源(如邻近的几个风电场)的出力具有相关性，且灵活性供需间也存在相关性，本文采用条件概率分布解决相关性的问题。主要思想是在同一条件下，系统灵活性供需及裕量概率分布可采用卷和/卷差求取，本文模型以负荷水平 C 作为条件，该条件下灵活性供需及裕量分布如式(11)–(13)所示。

$$\varphi_X^A(x|C, \tau) = \bigoplus_{i \in S} \varphi_{X_i}^A(x_i|C, \tau) \quad (11)$$

$$\varphi_Y^A(y|C, \tau) = \bigoplus_{i \in D} \varphi_{Y_i}^A(y_i|C, \tau) \quad (12)$$

$$\varphi_M^A(z|C; \tau) = \varphi_X^A(x|C; \tau) \ominus \varphi_Y^A(y|C; \tau) \quad (13)$$

进而可采用全概率方法计算系统灵活性裕量的概率分布，如式(14)所示。

$$\varphi_M^A(z|\tau) = \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} f(C) \varphi_M^A(z|C; \tau) dC \quad (14)$$

3 电力系统灵活性调节机理

灵活性资源种类及其广泛，但从作用机理来看，主要是通过改变供给/需求曲线位置或形状，进而降低系统灵活性不足区域面积。本文根据不同灵活性资源的作用效果，提出了曲线平移、曲线整形及综合3类调节机理。本文以下调灵活性为例说明电力系统灵活性调节机理，其他类型的灵活性可以做类比推理。

表3给出了电力系统3类灵活性资源的特征对比。图7为系统下调灵活性供给和灵活性需求概率分布示意图，其中实线代表原始数据，供给小于需求的场景即代表系统灵活性不足，会造成可再生能源限电。虚线代表灵活性资源的作用效果，其中曲线A→曲线B的过程即是曲线平移类灵活性资源的作用结果，曲线C→曲线D代表曲线整形类灵活性资源的作用，可以看出灵活资源作用后阴影区域面积减少。

表3 电力系统灵活性调节资源类型

Tab. 3 The type of power system flexible resources			
灵活性资源类型	作用效果	数学运算	举例
曲线平移类	灵活性概率分布平移	$\varphi_{\tilde{X}_i}(x) = \varphi_{X_i}(x + \Delta x)$	灵活机组、灵活热源
曲线整形类	概率分布形状变化	$\begin{cases} \tilde{y}_i(t) = y_i(t) + \Delta y_i(t) \\ \varphi_{\tilde{Y}_i}(y) = \varphi_{Y_i}(y) \oplus \varphi_{\Delta Y_i}(y) \end{cases}$	需求侧响应、储能、自备电厂、互联电网
综合类	平移与整形的综合效果	$\begin{cases} \varphi_{\tilde{X}_i}(x) = \varphi_{X_i}(x + \Delta x) \\ \tilde{y}_i(t) = y_i(t) + \Delta y_i(t) \\ \varphi_{\tilde{Y}_i}(y) = \varphi_{Y_i}(y) \oplus \varphi_{\Delta Y_i}(y) \end{cases}$	电热泵

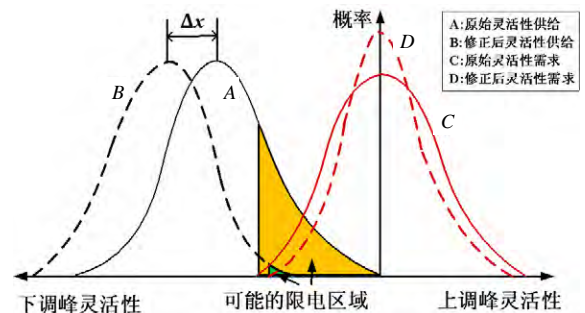


图7 电力系统灵活性调节机理示意图

Fig. 7 Power system flexibility regulating principle

4 仿真分析

4.1 算例系统介绍

以我国北部某区域电网的历史预测、实测数据和电源结构等数据为基础，进行算例分析，主要探讨：1) 基于非时序生产模拟结果，以24h调峰灵

活性为研究对象，评估系统目标年的灵活性供需平衡关系；2）研究时间尺度对灵活性供需及评价指标的影响；3）基于调节性能评价及其与降低新能源限电量关系的多类灵活性资源优化规划。

算例系统电源结构与调峰能力如表 4 所示，调峰能力指电源调峰容量与装机容量之比。最大负荷 48400MW，最小负荷 34130MW，风电装机 24000MW，光伏装机 6460MW，水电装机 540MW，含水电可再生能源装机占负荷峰值 64%，属于高比例可再生能源系统。

表 4 算例系统电源结构与调峰能力

Tab. 4 The generation portfolio and peak shaving capacity

项目	装机容量/MW	调峰能力(比率)
水电	540	1
常规火电-大容量	30300	0.50
常规火电-中容量	4000	0.40
常规火电-小容量	4930	0.30
CHP-大容量	23900	0.20
CHP-中容量	1200	0.15
CHP-小容量	3050	0.10

待评估时段内系统电/热负荷需求以及新能源可发出力累积概率分布如图 8。

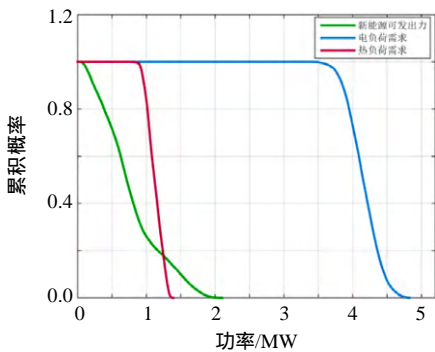


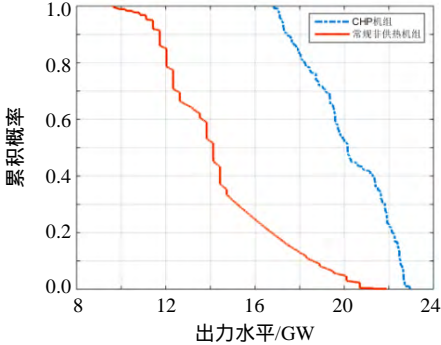
图 8 系统热、电负荷需求及新能源出力累积概率分布

Fig. 8 The cumulative PDF of system heat, load demand and new energy output

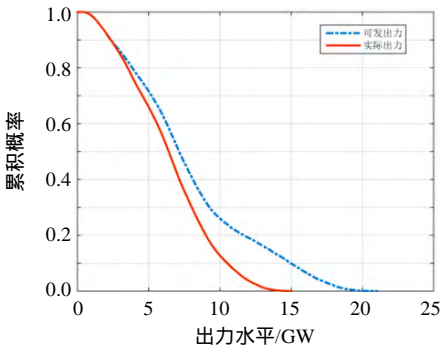
4.2 系统目标年灵活性供需平衡关系评估

本节对系统目标年的供暖期和非供暖期进行生产模拟分析，评估其灵活性。利用非时序生产模拟方法，可得到系统各类电源在评估周期内出力的累积概率分布。以供暖期为例，图 9(a)所示为常规非供热机组、CHP 机组出力的累计概率分布曲线。

由图 9(a)可知，由于“以热定电”原因，导致 CHP 出力分布与热负荷需求分布较为相似，而非供热机组出力较为分散，主要分布在低出力和高出力区域，低出力区域主要是为了降出力从而为消纳新



(a) 常规电源



(b) 新能源

图 9 各类电源出力的累积分布

Fig. 9 The CDF of the output for all type of generators

能源提供空间，而高出力区域则是在新能源出力较低时提供备用支持。

图 9(b)所示为系统实际可接纳新能源出力与可发出力累积概率分布的对比，两者面积差与评估周期时间乘积即为新能源限电量。可以看出新能源在各个出力水平均有不同程度的限电量，出力水平较高的时段其限电概率较高。

基于上述生产模拟的评估结果，可以计算系统灵活性供给与需求的概率分布，以调峰时间尺度(24h)为例，供暖期和非供暖季的计算结果分别如图 10(a)、(b)所示。可以看出，系统在供暖期下调灵活性供给较差，与灵活性需求的重叠区域面积很大，多数场景下无法提供下调灵活性(供给为 0 的概率很高)。

根据本文提出的指标体系，可以计算得到系统各方向的灵活性裕量概率分布，如图 11 所示。可以看出，系统在供暖期下调灵活性裕量分布在负半轴部分较多，说明系统下调灵活性严重不足，而上调灵活性裕量分布主要分布在正半轴，较为充裕。在非供暖期，系统上下调灵活性裕量均主要分布在正半轴，说明系统该时期各方向的灵活性均较为充裕。

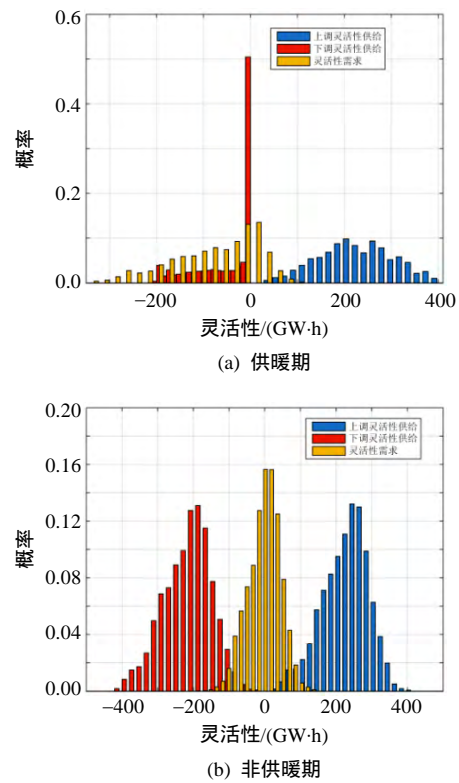


图 10 系统灵活性供、需概率分布对比
Fig. 10 The comparison of the PDF between system flexibility resource and demand

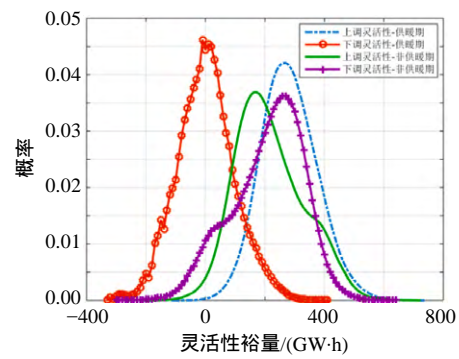


图 11 系统上下调灵活性裕量概率分布对比
Fig. 11 The comparison of the PDF for system upward and downward flexibility adequacy

在此基础上，设定阈值 β 为评估时段负荷或新能源消纳需求的 5%，可根据表 2 公式计算灵活性指标，并给出上调灵活性不足导致的负荷损失量及下调灵活性不足导致的新能源限电量，如表 5 所示。

表 5 所示计算结果验证了上述分析结果，FDS 指标为 0 说明给定阈值下不存在灵活性缺额，即系统在非供暖期的上下调灵活性及供暖期上调灵活性均具有较高的充裕性。而供暖期下调灵活性明显较差。指标的指示性明显，灵活性不足期望与系统失负荷量、新能源限电量呈近似线性关系。

表 5 系统规划年基准情况下灵活性评估结果

Tab. 5 The flexibility evaluation results in target year					
时期	方向	FNS	EFNS/(MW·h)	FDS/(MW·h)	损失电量/(GW·h)
供暖期	上调	0.0005	12.0162	0	0.0610
	下调	0.4748	37287	159390	9208.3
非供暖期	上调	0.0132	513.478	0	0.7197
	下调	0.0564	2930.9	0	910.79
综合	上调	0.0051	185.618	0	0.7807
	下调	0.2030	17141	103430	10119

4.3 多时间尺度电力系统灵活性定量评估

本节分析 15min~24h 时间尺度下系统灵活性需求、供给及灵活性指标的变化趋势，研究尺度间隔为 15min。由于需求和供给均为概率分布，本节取其 95% 分位点进行分析。考虑高比例可再生能源前后系统灵活性需求及资源供给在各时间尺度的变化曲线如图 12 所示。

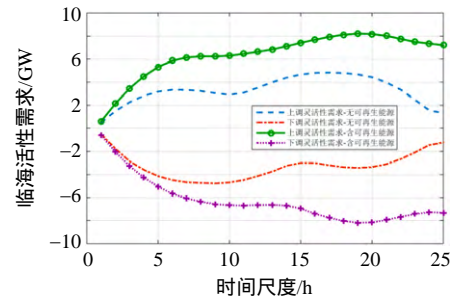


图 12 灵活性需求与时间尺度的关系
Fig. 12 The relationship between flexibility demand and time scale

可以看出，在不含可再生能源系统中，随着时间尺度的增加，系统上下调灵活性需求均呈现先增后降的波动特性；考虑高比例可再生能源后，系统上下调灵活性需求均有较大增加，随着时间尺度增加，系统灵活性需求呈现增长趋势，最终趋于饱和。

以系统下调灵活性为例，根据本文提出的多时间尺度灵活性定量评价模型，可计算得到灵活性指标随时间尺度的变化规律，如图 13 所示，其中不

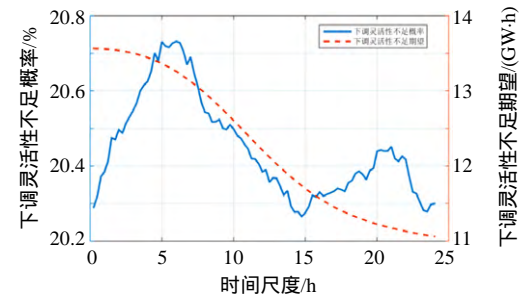


图 13 灵活性指标与时间尺度的关系
Fig. 13 The relationship between flexibility indices and time scale

足期望为平均每小时的灵活性不足量。

可以看出，系统灵活性不足概率指标随时间尺度增加的变化不大，呈现先增后降的波动规律。而灵活性不足期望则随着时间尺度增加呈现降低趋势，主要原因是长时间尺度下系统的调节能力增强，灵活性缺额量减少。

4.4 各类调节手段对系统灵活性的影响分析

本节研究各类资源对系统灵活性的量化影响，分别考虑储能设备、灵活机组、电锅炉 3 类灵活性资源。为了简化分析过程，本节主要针对供暖期进行分析，研究各类灵活性手段对该时期系统灵活性的量化影响。

本节基于成本/效益分析法，对各类手段对系统的灵活性影响进行排序，假定各资源均建设 5000MW，各类资源的投资成本如表 6 所示。

表 6 各类灵活性资源投资成本和最大投资容量
Tab. 6 The investment cost and maximum capacity for each flexibility option

灵活性措施/资源	单位投资成本/ (万元/MW)	总投资/亿元	最大容量/MW
火电机组调峰改造	50	25	12000
储能设备	450	225	5000
电热泵	580	290	10000

采用本文提出的灵活性供需评估方法，可以得到分别采用上述 3 类措施后，系统在供暖期下调灵活性裕量概率分布变化，如图 14 所示。随着各类措施的使用，系统灵活性裕量概率分布形状发生了相应变化，并向右进行了不同程度的平移，说明系统灵活性的裕量有所提升。

由图 14 可知，在投资容量相同的情况下，不同措施对系统灵活性提升的量化效果不同，从裕量

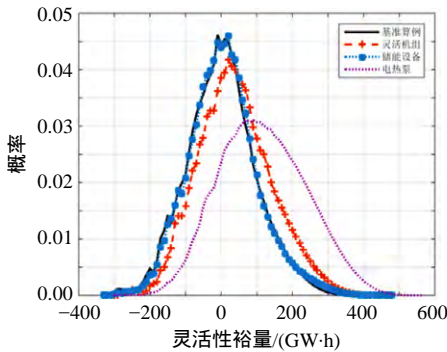


图 14 各类措施对系统供暖期下调灵活性裕量影响
Fig. 14 The impact of each flexibility option on the downward flexibility adequacy in heating season

概率分布变化效果来看，电热泵灵活性改造对系统灵活性提升的效果最高，其次是灵活机组，储能设备提升效果并不显著。表 7 给出了量化的灵活性评价指标。

表 7 不同灵活性措施对下调灵活性的影响

Tab. 7 The impact of each flexibility option on the downward flexibility

灵活性措施	FNS	EFNS/(MW·h)	FDS/(MW·h)	损失电量/(GW·h)
基准算例	0.4748	37287.0	159390	9208.3
灵活机组	0.3460	24194.0	117050	7156.8
储能设备	0.4592	34414.0	147670	8301.9
电热泵	0.1632	9562.9	0	2315.4

由表 7 可进一步推断，各类手段单位成本改善效果中，灵活机组>电热泵>储能设备。另外可以看出，各种单一手段对系统灵活性虽有提升，但是均无法完全消除系统灵活性的不足，在实际灵活性规划中，需要采用多种手段的组合，才有可能全面消除系统的灵活性不足现象。然而传统电力电量平衡中，难以综合考虑上述所有因素，因此，灵活性平衡机理为更好地实现源-网-荷-储综合优化提供了基础理论和分析方法。

4.5 基于灵活性评价的灵活性资源优化规划分析

考虑上述 3 类灵活性资源，按照单位投资成本收益从高到低进行灵活性资源选择，设定灵活性不足概率限额为 5%。在上述规划容量限制内逐步增加灵活性资源数量，直至满足灵活性指标要求，得到最优的灵活性规划结果，如表 8 所示。

表 8 灵活性资源优化规划结果

Tab. 8 The optimal flexibility planning results

灵活性措施	容量/MW	投资成本/亿	降低弃风量/(GW·h)
调峰改造容量	12000	60	4733.4
电热泵	3500	203	5185.6
合计	15500	263	9919.0

可以看出，经济性最好的灵活机组及电热泵资源组合已经可以满足灵活性要求，因此不需要再对储能进行投资。图 15 所示为不同规划容量下系统灵活性指标的变化趋势。

表 9 所示为系统灵活性规划前后的运行指标，可以看出，灵活性规划后，新能源消纳量增加，限电概率降低至 5% 以内。由于系统运行点整体向下平移，导致系统上调灵活性不足的风险增加，但是仍然在允许范围(5%)内。

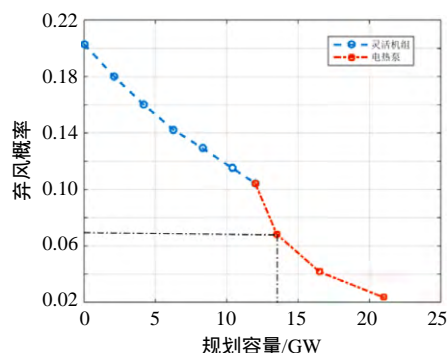


图 15 不同灵活性资源规划容量下的灵活性指标趋势

Fig. 15 The relationship between flexibility and the capacity of planned flexible resources

表 9 规划前后系统新能源消纳及灵活性指标对比

Tab. 9 The comparison of new energy consumption and flexibility indices before and after the planning

指标	规划前	规划后
新能源消纳量/(GW·h)	52990	62909
下调灵活性不足概率	0.2030	0.0500
上调灵活性不足概率	0.0053	0.0249

5 结论

安全、可靠、灵活、经济四个特性中，灵活性是高比例可再生能源并网的未来电力系统的核心，且难于量化。论文对电力系统灵活性的定义、特征及供需平衡机理的一般数学形式进行了阐述，并建立了灵活性的多维度指标体系和多时间尺度供需概率模型，实现系统多时间尺度灵活性的量化评估。

本文分析了不同类型灵活性资源对系统灵活性概率分布曲线的平移、整形效果，并据此对灵活性资源进行分类，揭示了电力系统灵活性平衡机理。

仿真分析表明，本文提出的灵活性指标能够与负荷损失风险、新能源限电建立明确的物理关联；本文所提模型能够快速对各类灵活性资源的成本效益进行量化分析，从而可充分挖掘源-网-荷-储等各环节资源来满足灵活性要求。

电力系统灵活性量化评估和平衡机理是灵活性资源优化规划的基础，本文未来研究方向是将该模型应用到电力系统规划中，构建满足系统灵活性水平要求的最优资源组合。

参考文献

[1] Schellekens G, Battaglini A, Lilliestam J, et al. 100% Renewable electricity: a roadmap to 2050 for Europe and North Africa[R]. London, UK: PricewaterhouseCoopers, 2010.

[2] Hand M M, Baldwin S, DeMeo E, et al. Renewable electricity futures study[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2014.

[3] 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径研究[R]. 北京: 国家发展和改革委员会能源研究所, 2015.

Energy Research Institute National Development and Reform Commission. China 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study[R]. Beijing: Energy Research Institute National Development and Reform Commission, 2015(in Chinese).

[4] International Energy Agency. Harnessing variable renewables[M]. Paris: International Energy Agency, 2011: 41-67.

[5] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. The role of power system flexibility in generation planning[C]//Proceedings of 2011 IEEE Power Engineering Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2011: 1-6.

[6] Cochran J, Miller M, Zinaman O, et al. Flexibility in 21st Century power systems[R]. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, Dublin: University College Dublin, Paris: International Energy Agency, California: Electric Power Research Institute, Portland: Northwest Power and Conservation Council, Finland: VTT Technical Research Centre, New Delhi: Power System Operation Corporation, 2014.

[7] Electric Power Research Institute. Metrics for quantifying flexibility in power system planning[R]. California, USA: Electric Power Research Institute, 2014.

[8] 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): 147-158.

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): 147-158(in Chinese).

[9] Yasuda Y, Gomez-Lazaro E, Menemenlis N, et al. Flexibility chart: evaluation on diversity of flexibility in various areas[C]//Proceedings of 12th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants. London, UK, 2013: 6.

[10] International Energy Agency. The power of transformation: wind, sun and the economics of flexible power systems[R]. Paris: International Energy Agency, 2014.

[11] Ma Juan, Silva V, Belhomme R, et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 200-209.

[12] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. valuation of power

- system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.
- [13] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. Transmission, variable generation, and power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 57-66.
- [14] Nosair H, Bouffard F. Flexibility envelopes for power system operational planning[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(3): 800-809.
- [15] Zhao Jinye, Zheng Tongxin, Litvinov E. A unified framework for defining and measuring flexibility in power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 339-347.
- [16] Ulbig A, Andersson G. Analyzing operational flexibility of electric power systems[C]//Proceedings of 2014 Power Systems Computation Conference (PSCC). Wroclaw: IEEE, 2014: 1-8.
- [17] Thattai A A, Xie Le. A metric and market construct of inter-temporal flexibility in time-coupled economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3437-3446.
- [18] Holttinen H, Tuohy A, Milligan M, et al. The flexibility workout: managing variable resources and assessing the need for power system modification[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2013, 11(6): 53-62.
- [19] 肖定垚, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1569-1576.
Xiao Dingyao, Wang Chengmin, Zeng Pingliang, et al. A survey on power system flexibility and its evaluations[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1569-1576(in Chinese).
- [20] Sach T. Flexibility tracker: indicators for power system flexibility[R]. Berlin: ECOFYS, 2016.
- [21] Wang Xifan. Equivalent energy function approach to power system probabilistic modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 823-829.
- [22] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非时序生产模拟的风电消纳评估方法[J]. 电力建设, 2015, 36(10): 129-137.
Li Haibo, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. Evaluation method of wind power accommodation capacity based on non-sequential production simulation[J]. Electric Power Construction, 2016, 36(10): 129-137(in Chinese).



鲁宗相

收稿日期: 2016-12-13。

作者简介:

鲁宗相(1974), 男, 博士, 副教授, 研究方向为风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网, luzongxiang98@tsinghua.edu.cn;

李海波(1990), 男, 博士研究生, 研究方向为风电并网的风险/可靠性评估、消纳分析及灵活性评估, li-hb12@mails.tsinghua.edu.cn;

乔颖(1981), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源、分布式发电、电力系统安全与控制, qiaoying@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)

Flexibility Evaluation and Supply/Demand Balance Principle of Power System With High-penetration Renewable Electricity

LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying

(Tsinghua University)

KEY WORDS: high-penetration renewable electricity; flexibility; supply/demand balance principle; quantitative assessment; non-sequential production simulation

With the integration of high shares of variable renewable energy (VRE), both increasing uncertainty of VRE and load make it difficult to envelope the total uncertainty by increasing reserve in a technical or economic way and urgently request to establish a new flexibility balance rules. However, the fundamental theory about flexibility is not clear and unsolved. Power system flexibility has many characters while the current researches are only focused on one or several characters, which cannot consider all the aspects and reflect the complex characters of power system flexibility.

Firstly, this paper proposed the definition of power system flexibility and its characters, then introduced the universal mathematical description of power system multiple time scale flexibility “supply/demand” balance based on probability theory:

$$\Pr(Z^A; \tau) = \sum_{C_i \in S_C} \Pr(C_i) \Pr(Z^A | C_i; \tau) \leq \theta_\tau, \quad \forall \tau \quad (1)$$

In order to assess the system flexibility, some evaluation indices are proposed as:

Tab. 1 Power system flexibility evaluation indices

Indices	Calculation equation
PDF of flexibility margin	$\varphi_M^A(z \tau) = \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} f(C) \varphi_M^A(z C; \tau) dC$
Probability of flexibility not satisfied	$\text{FNS}^A(\tau) = \int_{-\infty}^0 \varphi_M^A(z \tau) dz$
Expectation of flexibility not satisfied	$\text{EFNS}_F^A = \int_{-\infty}^0 (-z) \varphi_M^A(z \tau) dz$
Flexibility shortage	$\text{FDS}_\beta^A(\tau) = \max[\alpha; \int_{-\infty}^\alpha (-z) \varphi_M^A(z \tau) dz \leq \beta]$

Then the multiple time horizon flexibility supply model for each resource is proposed.

$$\begin{cases} \varphi_{X_\kappa}^+(x; \tau) = \varphi_{P_\kappa}(f_\kappa^{-1}(u; \tau)), \quad \kappa \in \{g, \text{net}, \text{st}, \text{dr}\} \\ \text{s.t.} \quad f_g(\tau; P_g) = \int_0^\tau \min[R_g^+ t, P_{g \max} - P_g] dt \\ f_{\text{net}}(\tau; P_{\text{net}}) = \int_0^\tau \min[R_{\text{net}}^+ t, P_{\text{net}}^{\text{net}} - P_{\text{net}}] dt \\ f_{\text{st}}(\tau; P_{\text{st}}, E_{\text{st}}) = \min[(P_{\text{st} \max} - P_{\text{st}})\tau, E_{\text{st} \max} - E_{\text{st}}] \\ f_{\text{dr}}(\tau; P_l) = \min[k_l P_l \tau, E_{l \max}] \end{cases} \quad (2)$$

After that, the power system flexibility demand

model is given. The total PDF of demand is the convolution of load demand and RE. The model for flexibility demand from load demand is shown in (3). The model for RE can be obtained similarly.

$$\varphi_{Y,L}(y|\tau) = \int_{P_{L \min}}^{P_{L \max}} \Pr(P_L) \varphi_{Y,L}(y|P_L; \tau) dP_L \quad (3)$$

Finally, the PDF of flexibility adequacy can be calculated by the conditional convolution of supply and demand based on the total probability formula:

$$\begin{cases} \varphi_X^A(x|C, \tau) = \bigoplus_{i \in S} \varphi_{X_i}^A(x_i|C, \tau) \\ \varphi_Y^A(y|C, \tau) = \bigoplus_{i \in D} \varphi_{Y_i}^A(y_i|C, \tau) \\ \varphi_M^A(z|C; \tau) = \varphi_X^A(x|C; \tau) \odot \varphi_Y^A(y|C; \tau) \\ \varphi_M^A(z|\tau) = \int_{C_{\min}}^{C_{\max}} f(C) \varphi_M^A(z|C; \tau) dC \end{cases} \quad (4)$$

Based on the above flexibility adequacy model, the flexible promotion options were divided into 3 types according to their action mechanism.

The impact of flexibility planning on the indices are included in Tab.2. It indicates that the RE absorption increases after the planning with the decrease of the probability for downward flexibility not satisfied (FNS⁻). The optimal flexibility planning path is shown in Fig.1.

Tab. 2 The flexibility indices before and after planning

Indices	Before planning	After planning
RE absorption/(GW·h)	52990	62909
FNS ⁻	0.2030	0.0500
FNS ⁺	0.0053	0.0249

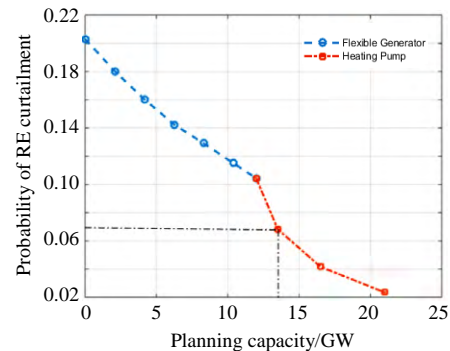


Fig. 1 The optimal flexibility planning path