

DOI: 10.7667/PSPC150806

电力系统灵活性评价研究综述

施涛, 朱凌志, 于若英

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 针对大规模风电场、光伏电站等间歇性电源接入后电力系统的灵活性问题, 从电力系统灵活性的定义、量化指标、评价方法三方面系统地总结了当前国内外电力系统灵活性评价研究的成果与进展。并在此基础上就广义的电力系统灵活性定义和内涵, 电力系统设备、网络、子系统等不同组成部分和层级的灵活性量化指标, 电源扩展规划、机组组合和经济调度等应用场景下的灵活性评价方法等问题进行阐述与讨论。最后, 对电力系统灵活性的研究进行了展望, 阐述了电力系统灵活性评价下一步研究中需要关注的问题和重点方向。

关键词: 灵活性; 量化指标; 评价方法; 电源规划; 调度运行

Overview on power system flexibility evaluation

SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Aiming at flexibility problem originated from integration of large-scale intermittent generation source, such as wind farm, photovoltaic power station, etc, the corresponding research achievements and process are systematically summarized from three aspects of power system flexibility: the concept and definition, quantitative indexes, evaluation method. On this basis, key issues of power system flexibility are expatiated and discussed, which include the generalized definition and connotation of power system flexibility; the quantitative flexibility evaluation indexes of power unit, power grid and power subsystem; the flexibility evaluation method in generation expansion planning, unit commitment and economic dispatch scenarios, etc. Finally, the research direction of power system flexibility is prospected and the concerns in the next research stage of power system flexibility evaluation are expounded.

Key words: flexibility; quantitative index; evaluation method; generation plan; dispatching and operation

0 引言

近年来, 随着风电, 光伏发电等可再生能源发电技术的成熟和发展, 大量风电场, 光伏电站接入到现有电力系统中。与此同时, 风电场、光伏电站出力的间歇性、随机性和波动性对传统以水电、火电为主的电源结构及其对应下的电力系统规划运行产生了深刻的影响^[1-4]。现有电力系统对间歇性可再生能源发电(以下简称: 间歇性电源)的接纳能力, 以及间歇性电源接入后对系统的灵活性需求等问题成为各方讨论和关注的焦点^[5-8]。因此, 亟需一套完整的电力系统灵活性评价理论与方法, 指导间歇性

电源高渗透率条件下电力系统的优化规划与运行。围绕电力系统的灵活性, 目前研究和工程技术人员关注且致力于回答的几个问题为: (1)电力系统灵活性的定义和内涵。具体包括它的评价对象、评价目的及其对应的时间尺度。(2)电力系统灵活性的量化指标。具体指不同的评价对象在不同的时间尺度下, 其灵活属性或需求的量化。(3)电力系统灵活性的评价方法。灵活性评价理论和方法体系必须涵盖不同的评价对象, 不同的应用目的, 不同的时间尺度。围绕上述三个问题, 本文总结当前国内外针对电力系统灵活性评价研究的成果与进展, 并在此基础上就广义的电力系统灵活性定义和内涵, 电力系统设备、网络、子系统等不同组成部分和层级的灵活性量化指标, 电源扩展规划、机组组合和经济调度等应用场景下的灵活性评价方法等问题展开讨论。

基金项目: 中国电力科学研究院创新基金项目 (CEPRI: NY83-14-007)

1 灵活性的概念和内涵

1.1 灵活性的定义

电力系统的灵活性并不是一个全新的概念,早在20世纪90年代就有学者在文献中提到了电力系统的灵活性问题。当时的“灵活性”概念产生于传统电源扩展规划时的不确定性问题中,旨在评价在一定的经济成本约束下,输电系统的发展能否快速调整,以应对初始规划条件的变化^[9-11]。由于当时以水电、火电为主的电源结构的灵活性远远超过风电、光伏发电等间歇性电源,所以灵活性问题也未像现在这样受到广泛的关注。对于电力系统的灵活性,目前尚没有统一的定义,各国研究机构和研究人员的主要观点包括:

NERC把电力系统的灵活性定义为:电力系统供需两侧响应系统的不确定性变化的能力。NERC认为电力系统的灵活性也应包括:储存能量的能力;高效机组组合和经济调度的能力^[12]。

国际能源署(International Energy Agency, IEA)最早在向2008年日本北海道举行的G8峰会上提交的报告中针对可再生能源发电并网问题把灵活性定义为高渗透率间歇性电源接入条件下,电力系统保持可靠运行的能力。在其后续正式发布的报告^[13]中指出:一个灵活的电力系统应能在一定的经济成本约束下,快速响应供需两侧大幅的功率与能量波动,对可预见、不可预见的变化和时间迅速反应,负荷减小时减少供应,负荷增加时增加供应。一个灵活的电力系统既能消纳大量的间歇性电源发出的电能,又能经济和高效地处理过剩的电能,也能保证可预测和不可预测的间歇性电源出力不足时系统电力供应的充裕度。

文献[14]中电力系统的灵活性定义为:电力系统通过配置其各种资源,响应系统净负荷变化的能力。而“净负荷”又指原始负荷中扣除间歇性电源出力之后的剩余负荷。

文献[15]介绍了两种灵活性的概念。第一种是G.Stiger在1937年提出的经济灵活性概念^[16],它主要指经济系统短期运行时,在不考虑附加成本的前提下,适应不同需求条件变化的能力。第二种是在前者的基础上,针对电力系统指出:电力系统的灵活性体现在其能否以较低的成本,改变自身的配置或者运行方式,快速响应市场和监管条件的变化。文中认为电力系统灵活性的定义类似于适应性(调节适应新状况的能力)和鲁棒性(预先满足所有状况的能力)等相关的概念。

文献[17]讨论了短时间尺度内电力系统运行灵

活性的量化评价问题。文中强调电力系统灵活性的定义应针对电力系统运行中的某一特定的场景,作为其对应研究领域问题的延伸和扩展。任何单一、通用的关于电力系统灵活性的定义都是没有意义的。文中同时指出电力系统灵活性评价必须考虑其对应的经济代价,任何电力系统的灵活性都是在一定的经济代价下才能获取的。

文献[18]认为灵活性主要用来描述系统应对电力供需波动性和不确定性,在一定的经济代价约束下保持系统可靠性的能力。一个“灵活”的系统本身是一个相对的概念。比如:两个具备相同的负荷和风/光出力场景的系统,如果系统A比系统B在同一时间尺度内消纳更多的风/光电能,则就可认为系统A比系统B更为灵活。

文献[19-20]中讨论了不确定条件下的电力系统规划以及输电网络灵活性评估的问题。文中认为:从系统规划的角度,一方面扩展电源的选址定容需要考虑到当前输电网络的物理条件;另一方面输电网络在未来的建设与发展要在不改变当前的供电质量和连续性的条件下,保证新建电源的接入。文中将输电系统的灵活性描述为电源扩展和运行不确定性条件下,以合理的经济成本保证系统可靠性要求的能力。与文献[20]观点类似,文献[21]中分析了需求侧管理(Demand Side Management, DSM)在提高电力系统灵活性方面的作用,给出了电源、负荷统筹考虑的机组组合模型。此处,负荷不仅是影响电力系统运行的“随机源”,其可控部分同样可以通过利用DSM机制成为“灵活源”参与电力系统随机因素的应对中。

文献[22]认为电力系统的灵活性需求贯穿于电力系统发展的每一个阶段和电力系统运行的每一个过程,以应对运行中影响电力供需平衡的随机性和不确定性因素。在传统基于可控水、火发电的电源结构下,电力系统的随机性和不确定性主要源于负荷的波动,运行调度人员通过负荷预测、自动发电控制、经济调度等技术和市场手段满足了负荷随机波动下的电力系统灵活性需求。而现阶段,大量风/光间歇性电源的接入,从发电侧增加了电力系统运行的随机性和不确定性,为保证电力供需平衡,相应的灵活性需求也应专门考虑。就电力系统的灵活性评价而言,文中认为主要体现在三个方面,分别是:(1)物理条件方面,主要指电力设备元件本体的物理属性和调节能力;(2)工业技术方面,主要指维持电力平衡的控制措施和控制策略,如AGC等;(3)市场和交易机制方面,主要指利用价格杠杆和电力交易机制实现电力系统运行的灵活性需求。并且,

文中认为虽然风/光等间歇性电源从发电侧打破了原有基于负荷预测结果的灵活性控制机制,增加了系统的灵活性需求,但并不否认风/光等间歇性电源本身同样可以作为“灵活源”参与到电力系统的灵活性调节中(在一定的经济成本约束下,弃风、弃光同样可以作为快速灵活调节手段)。

针对市场和交易机制的灵活性,文献[23]中利用经验数据,分析了德国电力市场中负电价机制对提高电力市场灵活性、促进风电消纳的影响。2008年欧洲能源交易所(European Energy Exchange)在德国城市 Leipzig 正式决定允许负电价参与电力市场竞标。负电价机制的出现改变了以往一味强调提高技术灵活性、满足风电接纳的灵活性需求而忽略经济代价的误区,使电力系统更为高效和经济地应对影响电力供/需平衡的各种随机因素。

文献[24-25]中讨论了灵活性评价在含间歇性电源在内的电源规划调度运行中的角色和作用。文中指出大规模间歇性电源的引入,使得系统运行的随机性增强,其对应的灵活性需求直接影响到整个系统的电力电量平衡。因此,在传统用于电源扩展规划的随机生产模拟算法中增加了灵活性评估的环节,即从容量充裕度和运行灵活性两方面考虑问题。

1.2 灵活性的内涵

通过上述总结和分析,目前关于电力系统灵活性的定义或内涵可以归纳为以下几点:

(1) 电力系统灵活性并不是一个全新的、孤立的概念,它是电力系统运行在不同时间尺度上应对各种随机因素和不确定条件、保持电力和能量平衡的必然要求,它贯穿于电力系统发展与运行的每一个阶段和过程。

(2) 早期的电力系统灵活性需求主要针对对可控性较强的水电、火电为主的电源结构下,负荷波动、电站扩容等因素带来的随机性和不确定条件。电力系统规划和运行人员利用网架优化、负荷预测、经济调度等技术手段实现和满足了相应的灵活性需求。

(3) 现阶段,大量风电、光伏发电等间歇性电源的接入,改变了传统的电源结构,降低了整个电源系统的出力可控性,从发电侧增加了电力系统运行的随机性和不确定性,而原有的灵活性措施和能力并没有考虑到这部分的灵活性需求。因此,必须在原有的电力系统规划与运行理论和技术体系中针对间歇性电源带来的随机性和不确定性条件作专门考虑和处理。

(4) 广义的电力系统灵活性概念包含了电力系统在不同时间尺度上以合理的经济成本,应对各种

随机因素和不确定条件,满足各种安全约束条件,保持可靠供电的能力。狭义的电力系统灵活性概念主要指在机组组合和经济调度的时间尺度内,针对间歇性电源带来的随机性和不确定性条件,以合理的经济成本,满足各种安全约束条件,保持可靠供电的能力。

(5) 电力系统的灵活性及其对应的措施可以分为两大类:技术灵活性和市场灵活性。技术灵活性表现为电力系统中各设备、元件、电源、电网乃至整个系统的功率和能量调节能力(幅值和速度),它既包含元件和设备自有的灵活属性,也包含系统级配置和调度后表现出的整体灵活属性。从技术手段上包含电站和设备级的机组爬坡、能量存储和系统级的负荷预测、发电预测、机组组合、经济调度等。市场灵活性与电力系统灵活性需求的经济代价约束相对应,主要是通过电力市场交易规则和电价机制的灵活设计,使电力系统更为高效和经济地应对影响电力供/需平衡的各种随机因素,避免一味强调提高技术灵活性而忽略经济代价。市场灵活性观点的引入使得间歇性电源、负荷等传统的“随机源”同样可以作为“灵活源”参与到电力系统的灵活性调节中,丰富了提高电力系统灵活性的措施。

2 灵活性量化指标

电力系统灵活性根据评价对象的不同可以分为:输电系统灵活性和配电(需求侧)系统灵活性;也可以分为电源、储能、可控负荷和电力网络的灵活性。整个电力系统的灵活性来源于上述各组成设备或子系统自身的物理属性及其在系统中所处的角色和作用。根据上述关于灵活性概念和内涵的讨论,电力系统灵活性的量化指标应能反映出其在维持电力系统能量和功率平衡上的响应速度和调节幅度,即:

$$\begin{array}{ccccc} \text{Energy} & \rightarrow & \text{Power} & \rightarrow & \text{Ramp_Rate} \\ [\text{MWh}] & \frac{dE}{dt} & [\text{MW}] & \frac{dP}{dt} & [\text{MW/min}] \end{array} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,能量、功率、爬坡率三个物理属性本质上反映的是电力设备与系统在一定安全和经济约束下进行能量交换或转换时的响应速度和调节幅度。

2.1 设备级灵活性量化指标

电源、储能、可控负荷等设备的灵活性与其固有的物理属性和当前所处的运行状态相关。以传统发电机组为例,为应对负荷的变化,机组出力的灵活调节能力既取决于机组固有的额定容量、最小技术出力、启停时间、爬坡率等固有物理属性,又取

决于机组当前的启停和出力状态。目前大多数文献中设备级的灵活性指标都是基于设备的爬坡率、运行上下限、强迫停运率等物理约束考虑的。经济调度和机组组合场景下典型的设备级灵活性量化指标如式(2)~式(3)所示^[14-15]。

$$Flex_{i,u,t,+} = RR_{u,+} \cdot (t - (1 - Online_{i,u}) \cdot S_u) \quad (2)$$

$$Flex_{i,u,t,-} = RR_{u,-} \cdot t \cdot Online_{i,u} \quad (3)$$

$$Gen_{\min,u} \leq Prod_{i,u} + Flex_{i,u,t,+/-} \leq Gen_{\max,u} \quad (4)$$

上式中根据调节方向的不同将设备的灵活性分为向上调节灵活性和向下调节灵活性两个指标分别定义。其中： i 表示第 i 个时段； u 表示第 u 台设备； t 表示单位时段对应的时间尺度； $RR_{u,-}$ 表示第 u 台设备功率向上调节的爬坡率； $RR_{u,+}$ 表示第 u 台设备功率向下调节的爬坡率； $Online_{i,u}$ 为布尔变量，表示第 u 台设备在第 i 个时段的在/离线状态(1/0)； S_u 为第 u 台设备的启动时间(式中默认 $S_u \leq t$)； $Prod_{i,u}$ 为第 u 台设备在第 i 个时段内的出力状态； $Gen_{\max/\min,u}$ 表示第 u 台设备的运行出力上下限。当需要设备停运时，令 $Online_{i,u}=0$ ；当为储能设备时， $Gen_{\min,u} \leq 0$ 。当为可控负荷时，设备消耗能量， $Gen_{\max,u}=0$ ， $Gen_{\min,u} \leq 0$ ， $RR_{u,+}=0$ 。

2.2 电力网络的灵活性描述

通常意义上的电力系统灵活性资源包括：水电、火电、燃气发电等常规电源；抽水蓄能电站、电池、压缩空气等储能设施；电动汽车、可控负荷、微网等需求侧管理对象^[26-32]。上述设施相对于电力网络而言，其共有的特征就是同时具有能量、功率、爬坡率三方面的属性。由于电力网络本身并不具备能量变换和功率爬坡调节能力。因此，电力网络的灵活性也主要体现在其所能承受的传输容量即其功率属性上，而电力网络的功率属性又取决于组成电力网络的每一条支路的传输容量和整个网络的拓扑结构。文献[19]中基于输电支路的静态安全裕度和潮流分布因子定义了一种输电网络的灵活性指标，如式(5)~式(7)所示。

$$\bar{C}_{ij}(I_{\text{marg}}) = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{N_b} I_{\text{marg}}^{ij} C_{\text{tot}}^{ij}}{\sum_{i=1,j=1}^{N_b} I_{\text{marg}}^{ij}} \quad (5)$$

$$C_{\text{tot}}^{ij} = \sum_{k=1}^{N_{\text{gb}}} |C_k^{ij}| \quad (6)$$

$$C_k^{ij} = y_{ij} \cdot (Z_{ik} - Z_{jk}) \quad (7)$$

式中： \bar{C}_{ij} 为输电网络灵活性评价指标； N_b 为网络中的节点数目； i, j 为网络中支路的两端节点编号； I_{marg}^{ij} 为支路 ij 的电流裕度(最大工作电流与实际工

作电流的差值)； C_k^{ij} 为支路 ij 相对于节点 k 的潮流分布因子^[33]； C_{tot}^{ij} 为支路相对于所有发电机节点的潮流分布因子的绝对值之和； N_{gb} 为发电机节点数目； y_{ij} 为支路的串联导纳； Z_{ik} 为节点阻抗矩阵中节点 i, k 之间的互阻抗。

由上述指标的定义可知：电力网络的灵活性一方面取决于网络中各个支路的安全裕度，裕度越大，可用于传输电能的容量越大；另一方面，在安全裕度相等的情况下，各支路相对于发电机节点的潮流分布因子越小，发电机节点的出力扰动对电力网络运行状态的影响越小，网络也就越灵活。

2.3 系统级灵活性量化指标

系统级的灵活性量化指标主要用于衡量在一定的安全和经济约束下，整个系统所具备的灵活性调节能力和调节空间。目前针对系统级灵活性的量化指标主要分三种类型：(1)利用系统的可靠性指标量化系统灵活性^[34]。(2)基于系统中各“灵活源”的能量、功率、爬坡率等特性定义总的系统级的技术灵活性指标。(3)将系统各“灵活源”的经济特性与技术特性综合考虑，把经济代价约束纳入到系统的灵活性量化指标中。本文将介绍IRRE、NetFlexibility、T_USFI、TE_USFI四种典型的系统级灵活性量化指标。

2.3.1 量化指标一(IRRE)

文献[14]中系统级的灵活性量化指标定义为

$$Flex_{i,\text{System},t,+/-} = \sum_{\forall u} Flex_{i,u,t,+/-} \quad (8)$$

该指标主要用于分析机组组合和经济调度场景下系统在各个连续时段内的灵活性，并进一步应用到包含风电，光伏发电的电源扩展规划中，以解决常规电源扩展规划中主要注重容量的充裕度，而对实际运行中灵活性需求简化处理的情况。

在式(8)的基础上，文献[14]利用灵活性不足的概率期望值(Insufficient Ramping Resource Expectation, IRRE)来描述特定时序场景下的系统灵活性，具体定义如下：

$$AFD_{t,+/-}(X) = P(Flex_{t,+/-} \leq X) \quad (9)$$

$$NLR_t = NL_t - NL_{t-1} \quad (10)$$

$$1 \leq i \leq N \quad (11)$$

$$NLR_{i,t,+} = NLR_{i,t}, \forall NLR_{i,t} > 0 \quad (12)$$

$$NLR_{i,t,-} = -NLR_{i,t}, \forall NLR_{i,t} < 0 \quad (13)$$

$$IRRP_{i,t,+/-} = AFD_{t,+/-}(NLR_{i,t,+/-} - 1) \quad (14)$$

$$IRRE_{t,+/-} = \sum_{\forall i \in N} IRRP_{i,t,+/-} \quad (15)$$

式(9)中： $AFD_{t,+/-}(X)$ 是基于式(8)所得到的离散累积

分布函数,用来描述单位时间尺度为(如 15 min、30 min、1 h)时系统灵活调节能力的概率分布,可用 Kaplan-Meier 法^[35]估计的累积密度函数得出。 NLR_i 表示第 i 时段的净负荷量; $NLR_{i,t,+/-}$ 为第 i 时段为应对净负荷变化所需的灵活调节量; N 为净负荷时间序列样本量; $IRRP_{i,t,+/-}$ 为系统在第 i 时段内时间尺度为 t 的灵活调节能力不足概率; $IRRE_{i,t,+/-}$ 为系统在整个周期内时间尺度为 t 的灵活性不足的概率期望值。

2.3.2 量化指标二(NetFlexibility)

文献[25]在文献[14]、文献[36]的基础上进一步提出了用于机组组合和经济调度场景的系统级灵活性量化指标,如式(16)、式(17)所示。

$$NetFlexibility_{i,t,s,+} = RF_{i,t,s} - Contingency_{i,+} - NLR_{i,t} \quad (16)$$

$$NetFlexibility_{i,t,s,-} = NLR_{i,t} - Contingency_{i,-} - RF_{i,t,s} \quad (17)$$

式(16)、式(17)分别为系统向上和向下调节的灵活性指标,其中: i 为第 i 个时段; t 是单位时段的时间长度; s 为场景编号; $Contingency_{i,+/-}$ 是系统运行中所需的备用容量; 同式(10), $NLR_{i,t}$ 为前后两个时段的净负荷差。

定义 $RF_{i,t,s}$ 为

$$RF_{i,t,s} = \sum_{r=1}^R P_{r,i+1,s} - \sum_{r=1}^R P_{r,i,s} + \sum_{v=1}^V RES_{v,i+1,s} - \sum_{v=1}^V RES_{v,i,s} \quad (18)$$

式中: r 为灵活电源编号; R 为灵活电源数目; v 为可变电源(Variable Generation)编号; V 为可变电源数目; $P_{r,i,s}$ 为灵活电源 r 在场景 s 下第 i 个时段的机组出力; $RES_{v,i,s}$ 为可变电源 v 在场景 s 下第 i 个时段的机组出力。

系统的灵活性指标取决于向上调节时的最大值,向下调节时的最小值,即灵活电源向上/向下的调节空间,如式(19)~式(21)所示。

$$\text{Max / min } RF_{i,t,s} \quad (19)$$

$$P_{r,i+1,s} \leq P_{r,i,s} + Flex_{r,i,s}^{+,t} \quad (20)$$

$$P_{r,i+1,s} \leq P_{r,i,s} - Flex_{r,i,s}^{-,t} \quad (21)$$

2.3.3 量化指标三(T_USFI)

文献[20]针对电源扩展规划问题定义了不确定场景下的技术灵活性指标(Technical Uncertainty Scenarios Flexibility Index, T_USFI),如式(22)所示。

$$T_USFI_G = \sum_{NG} \Delta P_k^T \quad (22)$$

式中: NG 为新建电源的待选并网点数目; ΔP_k^T 为系统技术灵活性优化目标下,各待选并网点的注入功率。

系统技术灵活性的优化目标如式(23)所示。

$$\min \sum_{NL} (P_{ij}^{\max} - |P_{ij}^T|) \quad (23)$$

式中: P_{ij}^{\max} 为支路 ij 的传输容量上限; P_{ij}^T 为支路上的潮流。该优化模型的控制变量就是已建电源的注入功率和待建电源的注入功率(规划年负荷曲线给定)。

2.3.4 量化指标四(TE_USFI)

由上可知:电力系统的灵活性必须满足一定的经济代价约束,对此的处理方法一是对目标方案进行经济代价评估和校核,另一种是直接将经济代价最小化纳入到系统的灵活性优化目标中。文献[20]中针对电源扩展规划问题,提出了一种不确定场景下的技术经济灵活性指标(Technical Economical Uncertainty Scenarios Flexibility Index, TE_USFI),如式(24)所示。

$$\text{Min} \sum_{NL} C_{M_{ij}}^{\text{TE}} \cdot M_{ij}^{\text{TE}} + \sum_{NG \text{ OLD}} \left[C_k (P_{k\text{gen}})^{\text{TE}} - C_k (P_{k\text{gen}}) \right] + C_{\text{med}} \cdot |P_{\text{loss}}^{\text{TE}} - P_{\text{loss}}| \quad (24)$$

式中: $C_{M_{ij}}$ 为输电支路 ij 剩余容量的边际成本; M_{ij} 为输电支路 ij 的剩余容量; NL 为输电支路数目; $NG \text{ OLD}$ 为已建电源的并网点数目; $C_k(P_{k\text{gen}})$ 为节点 k 注入功率为 $P_{k\text{gen}}$ 时的发电成本; C_{med} 为网损的单位平均成本; P_{loss} 为系统网损。其中第一项 $\sum_{NL} C_{M_{ij}}^{\text{TE}} \cdot M_{ij}^{\text{TE}}$ 代表输电网络的剩余容量成本; 第二项 $\sum_{NG \text{ OLD}} \left[C_k (P_{k\text{gen}})^{\text{TE}} - C_k (P_{k\text{gen}}) \right]$ 代表已建电源的发电成本变化量; 第三项 $C_{\text{med}} \cdot |P_{\text{loss}}^{\text{TE}} - P_{\text{loss}}|$ 代表网损成本的变化量。

该优化模型对应的控制变量是成本约束下的已建电源的注入功率和待建电源的注入功率(规划年负荷曲线给定)。

对应的,系统在不确定场景下的技术经济灵活性指标(Technical Economical Uncertainty Scenarios Flexibility Index, TE_USFI)定义如式(25)所示。其中: NG 为待建电源的并网点数目。

$$TE_USFI_G = \sum_{NG} \Delta P_k^{\text{TE}} \quad (25)$$

另外,定义

$$C_{M_{ij}}^{\text{TE}} = \sum_{NG \text{ OLD}} C_k (P_{k\text{gen}})^{\text{TE}} \cdot RF(M_{ij}^{\text{TE}}, \sum_{NL} M_{ij}^{\text{TE}}) \quad (26)$$

式中: 第一项 $\sum_{NG \text{ OLD}} C_k (P_{k\text{gen}})^{\text{TE}}$ 是已建电源总的发电成本; 第二项 $RF(M_{ij}^{\text{TE}}, \sum_{NL} M_{ij}^{\text{TE}})$ 是分配因子,将总的发电成本发配到每条支路上。

实际上,输电支路剩余容量的边际成本不需要

任何人支付,但剩余容量的减少限制了网络以最低的成本进行能量供给的能力,同时对调度成本也带来影响。因此,剩余容量在这里作为一个影响经济代价的变量考虑。

3 灵活性评价方法

风电、光伏发电等间歇性电源接入到电力系统后,其对应的灵活性需求也同时纳入到相关的电源扩展规划、机组组合和经济调度等问题中。目前的处理方法:一方面,通过对间歇性电源出力状态的概率分布、转移频率、有效容量的等时序特性的量化,把间歇性电源出力的随机性及其对应的灵活性需求纳入到相关的随机生产模拟算法中^[37-42]。另一方面,根据给定的灵活性评价指标,开发单独的灵活性评价模块,对相关规划或运行方案进行灵活性评价和校核。本节针对后者,根据2.3节中相关灵活性指标的定义,介绍几种电源扩展规划、机组组合和经济调度问题中的灵活性评价方法。

3.1 电源扩展规划中的灵活性评价

文献[14]为解决包含风电场的电源扩展规划问题在以LOLE(loss of load expectation)和EENS(expected energy not served)为指标的容量裕度分析模块和生产成本分析模块之间,引入灵活性分析模块,通过启发式迭代分析,最终得到同时满足容量裕度和灵活性需求的电源扩展规划方案。文中针对系统的灵活性指标IRRE,提出了相应的求解算法流程,如图1所示。该算法的输入数据主要为负荷和间歇性电源的时序数据,间歇性电源以外的各常规机组的额定容量、强迫停运率、最大/最小运行出力、启停时间、向上/向下爬坡率、成本数据等。数据的时序分辨率取决于研究人员所关注的单位时间尺度(15 min、30 min、1 h等)。步骤(4)~步骤(11)按照式(8)~式(15)定义的各项指标和参数逐时段、逐步计算,最后得到该时序场景下系统的灵活性指标:IRRE。

文献[20]针对电源扩展规划中的不确定性因素,提出了一套基于T_USFI和TE_USFI灵活性指标,考虑输电网络约束的灵活性评价算法。该算法的主要思想是通过蒙特卡洛模拟得到节点注入功率和潮流数据,建立式(23)、式(24)对应的目标函数,并利用遗传算法进行求解,得到式(22)、式(25)对应的灵活性指标计算过程会形成两个数据库:数据库1由蒙特卡洛模拟得到支路潮流和节点注入功率;数据库2包括系统结构(如分布系数)、节点注入分量、支路余量、受成本限制的注入分量、受成本限制的支路余量、发电余量和损失成本等。

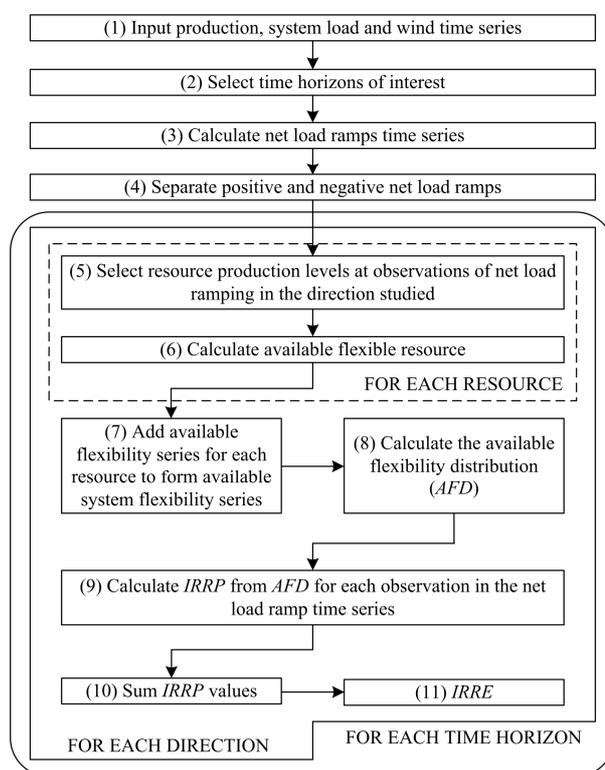


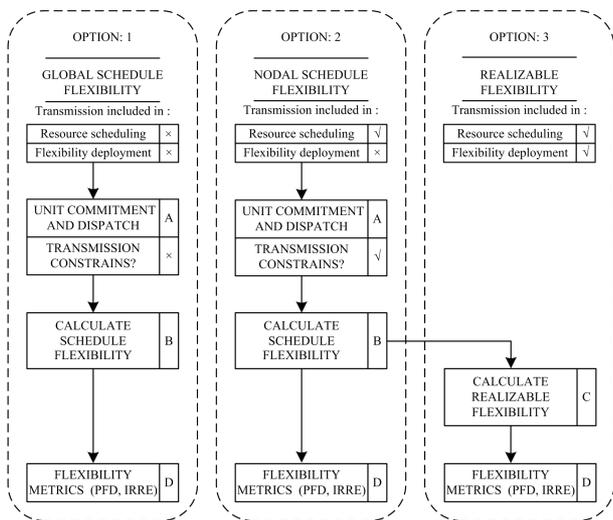
图1 IRRE求解算法流程图^[14]

Fig. 1 IRRE calculation algorithm^[14]

3.2 机组组合和经济调度中的灵活性评价

文献[25]基于文献[14]和文献[36]提出的IRRE和PFD(Periods of Flexibility Deficit)指标,介绍了一种经济调度和机组组合场景下的灵活性评价方法,以确定输电网络对系统灵活性的影响,如图2所示。文中认为在给定的电源结构和负荷水平下,输电系统的灵活性受两方面的影响:(1)机组组合经济调度模型中的输电网络约束;(2)由于“灵活源”在网络中分布的位置不同,输电阻塞(预测误差,或者突发故障造成)可能限制一部分系统灵活性的实现。图2描述了如何分析和量化输电网络对系统灵活性影响的分析过程。用于确定灵活性的三个选项被校核以用于验证建模的复杂性对灵活性评估的影响。

图2中包含3个选项、4个阶段。阶段A代表机组组合和经济调度过程,产生相应的调度计划;阶段B基于阶段A的调度计划,计算得出各“灵活源”在每个时段内具备的灵活性。阶段C用于确定输电阻塞对不同位置的“灵活源”的灵活性能否实现,即系统实际可用灵活性的影响;只有阶段C中包含在选项3中,是因为只有在阶段C中同时考虑了输电网络约束和输电阻塞对灵活性实现的影响。阶段D是根据上一阶段的结果,计算整个系统的灵活性指标。

图2 机组组合和经济调度中的灵活性评价^[25]Fig. 2 Flexibility evaluation in unit commitment and dispatch^[25]

选项 1 表示在不考虑输电网络约束的情况下, 根据优化目标制定对应时间尺度内的调度计划。基于这个调度计划, 可以计算得出每个“灵活源”在每个时段内的灵活性(阶段 B), 进而可以计算得出整个时间周期内系统的灵活性指标(阶段 D)。选项 2 中, 机组组合和经济调度模型中考虑了输电网络约束。阶段 B 和阶段 D 的作用和选项 1 中相同。选项 3 在选项 2 的基础上, 考虑了输电阻塞情况下, “灵活源”的分布对实际可用灵活性的影响(阶段 C)。因此, 选项 3 中可以确定输电网络约束和灵活源分布位置所决定的系统真正能实现的灵活性指标。

4 结论与建议

本文系统地总结了当前国内外针对电力系统灵活性评价研究的成果与进展, 并在此基础上就广义的电力系统灵活性定义和内涵, 电力系统设备、网络、子系统等不同组成部分和层级的灵活性量化指标, 电源扩展规划、机组组合和经济调度等应用场景下的灵活性评价方法等问题展开讨论。本文认为:

(1) 电力系统灵活性需求存在于电力系统规划和运行的各个阶段, 对应于不同的时间尺度。广义的电力系统灵活性概念旨在描述在一定的经济约束下, 电力系统在不同时间尺度上应对各种随机因素和不确定条件, 保持电力和能量平衡的能力。电力系统的灵活性包含技术灵活性和市场灵活性两方面。

(2) 电力系统灵活性的量化指标设计从技术的角度主要基于组成电力系统的设备、网络以及子系统在维持电力系统能量和功率平衡上的响应速度和调节幅度。这一方面取度量对象在能量、功率、

爬坡率等方面的物理属性; 另一方面又取决于其当前的运行状态和调节裕度。

(3) 电力系统灵活性评价方法与其对应的灵活性量化指标及应用场合密切相关。灵活性评价过程中既要考虑系统的技术灵活性, 又要考虑一定经济代价约束即市场灵活性; 既要考虑电源系统的潜在灵活调节能力, 又要考虑网络约束下的实际可用灵活调节能力。

(4) 电力系统灵活性理论与方法的研究应从目前的技术灵活性研究出发, 逐步往市场和交易机制的灵活性方面深入, 建立电力系统各灵活性调节措施对应的经济代价模型, 研究如何利用价格杠杆和电力交易机制来激发电力系统中潜在的灵活调节能力, 探索风电场、光伏电站、可控负荷等传统的“随机源”作为“灵活源”参与到电力系统灵活性调节中的可能性, 从技术和市场两方面构建适用于高渗透率间歇性可再生能源发电接入的电力系统灵活性理论与方法体系。

参考文献

- [1] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
CHI Yongning. Studies on the stability issues about large scale wind farm grid integration[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2006.
- [2] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 260-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 260-270.
- [3] 李生虎, 钱壮, 黄杰杰, 等. 基于多重故障和混合仿真算法的风电系统概率短路分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-7.
LI Shenghu, QIAN Zhuang, HUANG Jiejie, et al. Probabilistic short-circuit analysis of wind power systems with multiple contingencies and hybrid sampling[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 1-7.
- [4] 薛志英, 周明, 李庚银. 大规模风电接入电力系统备用决策评述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 148-155.
XUE Zhiying, ZHOU Ming, LI Gengyin. Survey on reserve decision of power systems with large scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 148-155.
- [5] 魏刚, 范雪峰, 张中丹, 等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响与对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.

- WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 135-141.
- [6] 郭小璇, 龚仁喜, 鲍海波, 等. 含新能源电力系统机会约束经济调度的二阶锥规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(22): 85-91.
- GUO Xiaoxuan, GONG Renxi, BAO Haibo, et al. Second-order cone programming method of chance constrained economic dispatch considering renewable energy sources[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(22): 85-91.
- [7] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(4): 10-17.
- HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology of new energy power generation projects[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(4): 10-17.
- [8] 张勇, 肖建, 迟永宁, 等. 基于机组调峰能力的电力系统风电接纳能力研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(6): 998-1003.
- ZHANG Yong, XIAO Jian, CHI Yongning, et al. Research of wind power acceptance ability based on peak regulation[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2014, 35(6): 998-1003.
- [9] BILLINTON R, ALAN R. Reliability evaluation of power system[M]. Second Edition. Plenum, 1996.
- [10] BILLINTON R, FIRUZABAD M F. A basic framework for generating system operating health analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(3): 1610-1617.
- [11] BERTOLDI O. Flexibility and reliability of power transmission network planning in a competitive market[J]. *L'Energia Elettrica*, 1998, 75.
- [12] North American Electric Reliability Corporation. Special report: potential reliability impacts of emerging flexible resources[R]. America: North American Electric Reliability Corporation (NERC), 2010: 2-6.
- [13] AGENCY I E. Empowering variable renewables-options for flexible electricity systems[M]. OECD Publishing, 2009: 13-14.
- [14] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 922-931.
- [15] HOBBS B F, HONIOUS J C, BLUESTEIN J. Estimating the flexibility of utility resource plans: an application to natural gas cofiring for SO₂ control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(11): 167-173.
- [16] STIGLER G. Production and distribution in the short run[J]. *Journal of Political Economy*, 1939, 47(3): 305-327.
- [17] MENEMENLIS N, HUNEAULT M, ROBITAILLE A. Thoughts on power system flexibility quantification for the short-term horizon[C] // *Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA, IEEE, 2011.
- [18] MA J, 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.
- [19] BRESESTI P, CAPASSO A, FALVO M C, et al. Power system planning under uncertainty conditions. criteria for transmission network flexibility evaluation[C] // *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, IEEE, 2003.
- [20] CAPASSO A, FALVO M C, LAMEDICA R, et al. A new methodology for power systems flexibility evaluation[C] // *2005 IEEE Russia Power Tech Conference*, St. Petersburg, Russia, IEEE, 2005: 1-6.
- [21] ROSSO A, MA J, KIRSCHEN D S, et al. Assessing the contribution of demand side management to power system flexibility[C] // *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) Orlando, FL, USA, IEEE*, 2011: 4361-4365.
- [22] KEHLER J H, HU M. Planning and operational considerations for power system flexibility[C] // *Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, Michigan, IEEE, 2011: 1-3.
- [23] NICOLOSI M. Wind power integration and power system flexibility-an empirical analysis of extreme events in Germany under the new negative price regime[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(1): 7257-7268.
- [24] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. The role of power system flexibility in generation planning[C] // *Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, 2011: 1-6.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 都亮, 刘俊勇, 田立峰, 等. 电力市场环境下秒级可中断负荷研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(16): 90-95.

DU Liang, LIU Junyong, TIAN Lifeng, et al. Seconds level interruptible loads and application in power market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 90-95.

[28] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25. HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.

[29] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响的综述[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 127-131. GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 127-131.

[30] 王承民, 孙伟卿, 衣涛, 等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 33-41. WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 33-41.

[31] 杨田, 刘晓明, 吴其, 等. 储能电站对电网相称性混合的影响研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 63-68. YANG Tian, LIU Xiaoming, WU Qi, et al. Research on the effect of energy storage station on assortative mixing in the power grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 63-68.

[32] HANSEN A B, NYBROE M H. Future possibilities-the gas system as flexibility provider for wind power production[C] // Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California, USA, IEEE, 2012: 1-8.

[33] 张伯明. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 202-207.

[34] MANGESIUS H, HIRCHE S, HUBER M, et al. A framework to quantify technical flexibility in power system based on reliability certificates[C] // The 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Kongens, Lyngby, Denmark, IEEE, 2013: 1-5.

[35] KAPLAN E L, MEIER P. Nonparametric estimation from incomplete observations[J]. Journal of the American Statistical Association, 1958, 53(282): 457-481.

[36] LANNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Assessment of power system flexibility: a high-level approach[C] // Power and Energy Society General Meeting, San Diego, California, USA, IEEE, 2012: 1-8.

[37] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 30-31. CHEN Shuyong, DAI Huizhu, BAI Xiaomin, et al. Power system probabilistic production simulation including wind power plants[J]. Electric Power, 2000, 33(3): 30-31.

[38] 张节潭, 程浩忠, 胡泽春, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 34-39. ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 34-39.

[39] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 26-31. ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Peak-load regulating adequacy evaluation associated with large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 26-31.

[40] 曲翀, 王秀丽, 谢绍宇, 等. 含风电电力系统随机生产模拟的改进算法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 115-121. QU Chong, WANG Xiuli, XIE Shaoyu, et al. An improved algorithm for probabilistic production simulation of power systems with wind power[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 115-121.

[41] 邹斌, 李冬. 基于有效容量分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 23-31. ZOU Bin, LI Dong. Power system probabilistic production simulation with wind generation based on available capacity distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 23-31.

[42] 谈天夫, 高山, 李海峰, 等. 基于等效间隔-频率分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 148-157. TAN Tianfu, GAO Shan, LI Haifeng, et al. Power system probabilistic production simulation based on equivalent interval frequency distribution including wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 148-157.

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2016-01-28

作者简介:

施涛(1982-), 男, 通信作者, 博士, 高级工程师, 从事新能源发电并网规划与优化运行技术研究; E-mail: shitao@epri.sgcc.com.cn

朱凌志(1975-), 男, 博士, 高级工程师, 从事新能源发电并网技术研究; E-mail: zhulingzhi@epri.sgcc.com.cn

于若英(1988-), 女, 硕士, 工程师, 从事新能源发电并网规划与优化运行技术研究。E-mail: yuruoying@epri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)