

考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价

肖定焱¹,王承民¹,曾平良²,孙伟卿³

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院,上海 200240;2. 中国电力科学研究院,北京 100192;

3. 上海理工大学 电气工程系,上海 200093)

摘要: 灵活性是衡量电力系统应对不确定性能力的重要指标。针对可再生能源发电所带来的功率不确定性,以灵活性特点分析为基础,提出衡量系统电源灵活性的数学模型及灵活性综合评价体系;电源灵活性模型考虑了可再生能源出力的最大突变量,并将约束条件细分为传统约束和灵活性资源约束 2 个方面;灵活性综合评价体系中,依据控制手段和研究对象不同,建立灵活性评价表,反映电力系统运行时的灵活性状态、变化及趋势,固有灵活性指标可比较不同运行状态和不同电力系统之间的灵活性。算例分析验证了该评价体系的有效性。

关键词: 可再生能源; 电力系统; 灵活性; 不确定性; 优化; 综合评价表; 固有灵活性

中图分类号: TM 732

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.019

0 引言

可再生能源发电 REG(Renewable Energy Generation)以及智能电网的不断发展,使电力系统的不确定性日益增强,给电力系统的规划、运行带来诸多负面影响^[1-4]。而电力系统灵活性是为应对不确定因素带来的负面影响,即在经济约束和运行约束下,某一时间尺度内,电力系统快速而有效地优化调配现有资源,快速响应电网功率变化、控制电网关键运行参数的能力^[5-8]。

灵活性指标结合不确定因素和电力系统 2 个方面的特点,全面衡量系统的灵活性。文献[9]根据巴西水电资源比重较大的特点,将灵活性量化为水电和火电发电切换能力及其所带来的经济效益,该指标应用局限性较大;文献[10]从经济性的角度定义了正负电价,并由此建立了大规模风电的灵活性评价模型;文献[11-12]中从潮流、网架等基础方面着手,将其量化为成本的函数,构建灵活性评价指标。文献[13]从某一时段负荷的功率谱密度着手,得出风电出力变化的周期图,并将其与可调度的灵活性资源图对比,得出大规模风电的灵活性价值评估。文献[14]以电力系统容量、能量存储容量、容量斜坡率和容量持续时间为基本参数,从单节点的功率注入分析出发,得到多节点灵活性潮流模型,针对电力系统运行灵活性建立了评估模型。文献[15]从规划的角度,建立了灵活性评价指标,有效应用

于电力系统规划中。文献[16-17]利用 Kaplan-Meier 法^[18]估计的累积密度函数得出可用灵活性资源的概率分布,并考虑到灵活性资源的相关性,通过临界点找到各种情况下的灵活性评估。

目前,关于灵活性指标模型的研究工作已经取得了一定的进展和成果,但也存在着一些问题,主要表现为以下几点。

a. 对电力系统灵活性资源考虑不全面。大部分灵活性模型中认为电力系统灵活性资源仅存在于火电、水电或风电中,未能全面考虑系统中的其他灵活性资源;同时,未考虑各类灵活性资源的特点及其特性对电力系统灵活性的影响程度。

b. 灵活性特点体现不足。对灵活性的特点把握不清,故没有将其完全体现在灵活性指标中,在量化灵活性指标时,也未考虑不确定性因素的影响。

c. 普适性较差。指标通常针对特定的电力系统或运行模式,不能比较运行状态间或不同系统间的灵活性。

针对目前灵活性指标模型研究中存在的问题,本文考虑到大规模 REG 不确定性,通过分析灵活性特点与灵活性资源,建立了具有显著物理意义的电源灵活性目标函数以及具有灵活性特点的约束条件,并由此得到了衡量电力系统运行灵活性的综合评价表以及衡量电力系统固有灵活性的指标,以此形成灵活性综合评价指标体系。

1 灵活性特点及资源

1.1 特点分析

灵活性与经济性、可靠性、安全性是并列关系,是现代电力系统分析中须着重考虑的重要因素。电力系统常以安全性和可靠性为前提,以经济性为目的,以灵活性为约束,实现电力系统优化运行、规划、调

收稿日期:2014-12-27;修回日期:2015-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407117);国家电网公司“千人计划”专项支持项目(CEPRI:XT71-12-028);上海市青年科技英才“扬帆计划”项目(14YF1410100)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407117),SGCC Special Project(CEPRI:XT71-12-028) and Yangfan Program of Shanghai(14YF1410100)

度等。

灵活性是电力系统的固有特征^[19],与可靠性和安全性均有交叉与不同。从安全性角度,不确定性因素带来的负面影响可能对电力系统安全性带来威胁,因而,灵活性可从应对不确定性能力的角度对安全性进行补充,是安全性研究中不可缺少的一环,但灵活性其自身又是从宏观的角度,对电力系统进行静态的评估,具有较强的针对性和独立性,特别地,当灵活性提高到一定程度时,对灵活性资源要求会更加苛刻,反而会使安全性略微下降;从可靠性角度,灵活性越高,系统可调节能力越强,相应的可靠性也会越高,但灵活性对可靠性的积极影响只局限于不确定性层面。电力系统灵活性与经济性、安全性及可靠性的变化趋势示意图如图 1 所示。

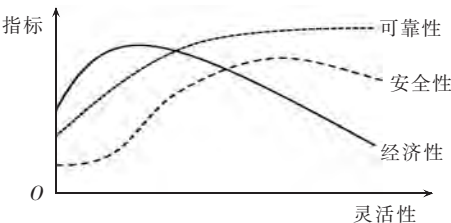


图 1 灵活性与经济性、安全性及可靠性的关系
Fig.1 Relationship between flexibility and economy/security/reliability

对于任意电力系统而言,其本身就具有一定能力应对不确定性带来的负面影响,灵活性的特点应充分考虑不确定因素及其给电力系统带来的影响。不确定性会使电力系统在短时间内出现功率不平衡问题,功率平衡情况不同时,电力系统的灵活性不同。因而,可认为电力系统灵活性具有向上与向下 2 个方向,分别对应电力系统功率供应小于需求和供应大于需求 2 种情况。同时,在应对系统不确定性时,需充分考虑系统的响应速度是否与不确定因素发生的时间尺度相匹配,即系统响应能力的时间特性。因此,电力系统灵活性的特点主要为具有方向性和时间尺度^[20]。

1.2 资源分析

理论上,电力系统运行过程中,所有的可调度的资源均可以成为灵活性资源,它们为系统所提供的灵活性是不断变化的,如图 2 所示。随着时间的推移,机组按照日前计划进行相应的调度运行,出力不断变化。机组出力上限和当前的差值即为机组的向上灵活性容量,称为系统的向上灵活性资源;机组当前出力与机组备用容量的差值即为机组的向下灵活性容量,称为系统的向下灵活性资源。因此,对于每一台机组而言,均具有一定的灵活性,而各台机组的灵活性容量之和,即为该系统灵活性资源的总容量。

电力系统灵活性资源作为灵活性需求响应以及

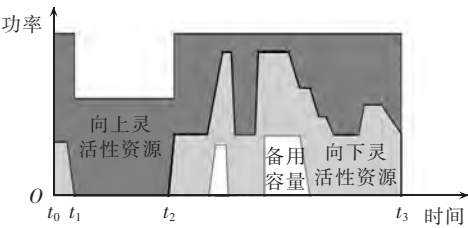


图 2 灵活性资源分析图
Fig.2 Analysis of flexible resources

灵活性指标的基础,是受到灵活性特点影响最大的部分。考虑到时间尺度、响应方向以及经济性约束,部分传统资源不适合作为灵活性资源,因而,灵活性资源是传统资源的真子集。

根据灵活性的方向性和时间尺度的限制,目前系统中可用的灵活性资源主要有 5 类:具备快速调节能力的火电站;抽水蓄能电站;区域互联电网;可中断负荷;各类储能系统。

对各类灵活性资源的评价如表 1 所示,在一定程度上说明了各类灵活性资源的特点与作用。

表 1 各类灵活性资源评价
Table 1 Evaluation of various flexible resources

灵活性资源	数量	质量	响应时间	经济性
可调节的火电	多	低	较长	低
抽水蓄能	多	高	较短	较高
可中断负荷	较少	普通	短	高
区域互联电网	较少	普通	普通	普通
储能	普通	高	短	较高

2 考虑 REG 功率不确定性的电源灵活性评价模型

2.1 目标函数

依据电力系统灵活性的要求,定义电源灵活性指标旨在从电源侧衡量电力系统应对不确定性因素的能力。在电源侧,造成系统不确定性的主要原因通常为可再生能源出力的变化,使系统功率平衡的不确定性增加,可再生能源接入电力系统的规模越大,其出力变化造成的后果越严重,因此,可将系统能够承受的可再生能源最大突变容量作为灵活性评价指标。本文以风电场为例,说明电源灵活性指标的相关问题。

考虑到灵活性的方向性,需分别评价 2 个方向上的电源灵活性,即风电场出力突然减小和突然增大 2 个方向,为与前述灵活性资源的方向对应,可将前者简称为向上灵活性,后者简称为向下灵活性,2 个方向的灵活性的本质相同。故以向上灵活性指标为例,其目标函数如下式所示:

$$\max \sum_{i=1}^N \Delta P_{wi}$$

(1)

其中, ΔP_{wi} 为研究区域内风电场 i 的出力变化,且以

风电场功率向下的变化为正, ΔP_{wi} 应不小于 0; N_w 为研究区域内风电场的个数。

本文定义的目标函数物理含义为系统所能承受的风电场出力的最大变化, 直观上而言, 即为系统应对风电场出力不确定性所带来的功率供应不足的能力。因此, 目标函数的值越大, 说明电力系统的应对能力越强, 电源灵活性则越佳。

需要说明的是, 该目标函数并不要求涵盖研究区域内的全部风电场, 可根据研究目的和对象的不同, 选择相应的风电场。同时, 模型的物理意义明确, 能够直观地反映可再生能源功率不确定性的情况以及系统灵活性情况。

2.2 约束条件

灵活性的特点与特性对灵活性指标有着较大影响, 响应灵活性需求的资源不同时, 灵活性指标的评价结果也会不同。灵活性指标模型的约束条件不仅需要考虑到传统电力系统约束, 也应兼顾灵活性背景下的新的约束条件及形式, 因此, 灵活性指标的约束条件可分为 2 类: 第一类约束条件为通用约束, 通用约束的形式与传统电力系统约束相似, 也是灵活性指标计算中必须考虑的约束; 第二类约束条件为灵活性资源约束, 灵活性资源反映了灵活性自身的特点及其对灵活性资源的特殊要求。在实际问题中, 并不是所有的灵活性资源都能够响应灵活性需求, 可依据当前灵活性需求和资源, 选择相应的约束, 因此, 灵活性资源约束是选择性约束, 视各个电源的接入情况以及运行人员的主观意愿而确定。

2.2.1 通用约束

a. 节点功率平衡。

由于目标函数的影响, 节点功率平衡方程应分别考虑风电节点和非风电节点。

对于风电节点, 功率平衡方程为:

$$\begin{cases} P_{Gk} - P_{Lk} - \Delta P_{wk} - U_k \sum_{j \in k} U_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}) = 0 \\ Q_{Gk} - Q_{Lk} - \Delta Q_{wk} - U_k \sum_{j \in k} U_j (G_{kj} \sin \theta_{kj} - B_{kj} \cos \theta_{kj}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{Gk} 、 Q_{Gk} 分别为节点 k 的有功功率和无功功率; P_{Lk} 、 Q_{Lk} 分别为节点 k 的有功负荷和无功负荷; ΔP_{wk} 、 ΔQ_{wk} 分别为节点 k 的风电有功变化和无功变化; U_k 为节点 k 的电压; G_{kj} 、 B_{kj} 、 θ_{kj} 分别为节点 k 和 j 之间的电导、电纳和相角差; $j \in k$ 表示节点 j 与节点 k 相连。

对于非风电节点, 功率平衡方程为:

$$\begin{cases} P_{Gk} - P_{Lk} - U_k \sum_{j \in k} U_j (G_{kj} \cos \theta_{kj} + B_{kj} \sin \theta_{kj}) = 0 \\ Q_{Gk} - Q_{Lk} - U_k \sum_{j \in k} U_j (G_{kj} \sin \theta_{kj} - B_{kj} \cos \theta_{kj}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

b. 电压约束:

$$U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \quad (4)$$

其中, U_k 、 $U_k^{\max}$ 、 $U_k^{\min}$ 分别为节点 k 的电压及其上、下限。

c. 线路约束:

$$P_l \leq \alpha P_l^{\max} \quad (5)$$

其中, P_l 、 $P_l^{\max}$ 分别为线路 l 的潮流值和限值; α 为线路的柔性裕度, 通常设为固定值。

d. 备用约束:

$$\sum_{k=1}^{N_g} P_{Lk} + H \leq \sum_{k=1}^{N_g} u_k P_{Gk} \quad (6)$$

其中, H 为备用容量; u_k 为标识量, 若发电机接入电网, 则 u_k 为 1, 否则为 0。

e. 风电场功率变化约束。

风电场接入电力系统时, 需满足国家标准的技术规定, 因此在考虑灵活性指标时, 各个风电场的最大出力变化需限制在国家标准以内^[21]。同时, 考虑到目标函数方向的问题, 风电场功率变化应满足如下条件:

$$0 \leq \Delta P_{wi} \leq \Delta P_{GB} \quad (7)$$

其中, ΔP_{GB} 为国家标准技术规定中的风电最大功率变化值, 该值与时间尺度相关, 若灵活性与标准中的时间尺度不匹配, 可用插值拟合, 确定限值。

2.2.2 灵活性资源约束

a. 时间尺度的选择。

电力系统灵活性的衡量建立在一定的时间尺度下, 灵活性资源的响应特性与时间尺度息息相关, 因此, 时间尺度的问题是灵活性资源约束的前提条件。

灵活性研究中将时间尺度设定为固定值, 考虑到不确定因素持续时间通常较短, 该时间尺度不宜过大, 同时, 为满足灵活性特点以及国家标准技术规定, 限定其取值, 即:

$$\Delta t = \{1 \text{ min}, 10 \text{ min}, 15 \text{ min}, 30 \text{ min}\} \quad (8)$$

当时间尺度超出 30 min 的范围时, 可认为该问题已经非常接近传统问题, 灵活性指标的参考意义下降, 相应的问题可采用传统方法求解。

b. 火电机组。

灵活性的时间尺度将影响火电机组的有功出力范围, 因此, 综合传统的上下限出力约束以及灵活性时间尺度与机组爬坡速率约束, 火电机组的有功出力约束可写成如下形式:

$$\max \{P_{TG, \min}, P_{TG, 0} - r_{Td} \Delta t\} \leq P_{TG} \leq \min \{P_{TG, \max}, P_{TG, 0} + r_{Tu} \Delta t\} \quad (9)$$

其中, P_{TG} 为火电机组的出力; $P_{TG, 0}$ 、 $P_{TG, \max}$ 、 $P_{TG, \min}$ 分别为火电机组的当前出力以及其出力的上、下限; r_{Tu} 、 r_{Td} 分别为火电机组的向上和向下的爬坡速率。

c. 抽水蓄能电站。

与火电机组相似, 抽水蓄能电站的有功出力约束可描述为:

$$\max \{0, P_{PG, 0} - r_{Pd} \Delta t\} \leq P_{PG} \leq \min \{P_{PG, \max}, P_{PG, 0} + r_{Pu} \Delta t\} \quad (10)$$

其中, P_{PG} 为抽水蓄能电站的出力; $P_{PG, 0}$ 、 $P_{PG, \max}$ 分别为抽水蓄能电站的当前出力以及其当前库容水平下所

允许的出力上限; r_{pu}, r_{pd} 分别为抽水蓄能电站的向上和向下的爬坡速率。

d. 可中断负荷。

可中断负荷的出力由 2 个方面综合决定:一方面为合同规定的最大出力变化的限制,另一方面为用户自身的出力预期的限制。因此,可中断负荷的出力约束可描述为:

$$\max \{0, P_{IL,0} - \Delta P_{IL,max}\} \leq P_{IL} \leq \min \{P_{IL,max}, P_{IL,0} + \Delta P_{IL,max}\}$$

(11)

其中, P_{IL} 为可中断负荷的出力; $P_{IL,0}, P_{IL,max}$ 分别为可中断负荷的当前出力以及其出力的上限; $\Delta P_{IL,max}$ 为可中断负荷的最大出力变化限制,该限制通常由电网与用户签订的合同决定。

e. 区域电网互联。

区域电网互联系统的出力限制有 2 个方面:一方面是联络线的最大传输功率限制,另一方面为最大交换功率限制。同时,由于区域电网互联系统既可以成为功率的供应侧,又可以成为功率的需求侧,因此,区域电网互联是出力可以为“负”的电源。则区域电网互联的出力约束可描述为:

$$|P_c| \leq \min \{P_{Line,max} - P_{Line,0}, \Delta P_{ex,max}\}$$

(12)

其中, P_c 为联络区域的出力; $P_{Line,0}, P_{Line,max}$ 分别为联络区域联络线上的当前传输有功功率和最大传输有功功率; $\Delta P_{ex,max}$ 为联络区域的最大功率交换限制。

f. 储能装置。

储能装置出力受到最大出力限制及其所储存的总能量的限制,其出力约束可以描述为:

$$|P_s| \leq P_{s,max}$$

$$W_{s,0} - W_{s,max} \leq P_s \Delta t \leq W_{s,0}$$

(13)

其中, P_s 为储能装置的出力; $P_{s,max}$ 为储能装置的最大出力限制; $W_{s,max}, W_{s,0}$ 分别为储能装置的存储能量的上、下限。

需要指出的是,灵活性资源约束中时间尺度可根据研究需要进行调整,但风电场功率变化约束也会有相应的调整;同时,5 类灵活性资源中,若某种资源被纳入至灵活性指标评估中,相应的约束条件才生效,可依据研究对象由专业人员依据经验决定。

3 电源灵活性评价体系

3.1 综合评价表

电力系统运行过程中,灵活性会随着系统运行工况的不同而改变;同时,对于同一工况而言,不同的灵活性资源对灵活性评价也会产生重要影响。因此,灵活性的评价应考虑不同时间尺度下,不同灵活性资源响应时,电力系统目前的灵活性指标值。

在确定的时间尺度下,根据控制手段和研究对象的不同,可以将电力系统电源灵活性评价指标细化

为如表 2 所示的形式。其中,控制手段即灵活性资源,它既可包含单一的控制手段,也可包含各种控制手段的组合;类似地,控制对象即风电场,既可以是单一风电场,又可以是多个风电场的组合;灵活性指标 $O_{i,j}$ 则由相应的控制手段和研究对象计算得出。例如,某研究区域风电场个数为 2,该研究区域内的可用灵活性资源为火电机组、水电机组以及储能装置,若控制手段考虑 3 种灵活性资源,则在某一确定的时间尺度下,上述情况下的电源灵活性指标模型的目标函数为式(1),约束条件则为式(2)—(10)及式(13),从而可得到该情况下的灵活性指标;若控制手段仅考虑火电机组及水电机组,此时的电源灵活性模型则不考虑式(13),评价情况与结果与前述的均不相同。每一种控制手段和研究对象均可认为是一种特定的运行模式。

表 2 电力系统电源灵活性评价表
Table 2 Power source flexibility evaluation
table for power system

控制手段	灵活性指标			
	研究对象 1	研究对象 2	研究对象 3	...
1	$O_{1,1}$	$O_{1,2}$	$O_{1,3}$	...
2	$O_{2,1}$	$O_{2,2}$	$O_{2,3}$	...
3	$O_{3,1}$	$O_{3,2}$	$O_{3,3}$	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

不同的时间尺度下可得到相应的灵活性评价表。此外,灵活性指标 $O_{i,j}$ 分为 2 个方向上的指标值,因此,灵活性评价表也有 2 个。灵活性综合评价表能完全反映电力系统运行过程中的灵活性状态,整体把握灵活性变化及趋势。

3.2 固有灵活性评价

对于任意电力系统,其在任意运行状态下都具有一定的灵活能力,即固有灵活性。固有灵活性表示了系统的内在特征,但由于灵活性特点的特殊性,固有灵活性依然与时间尺度以及灵活性资源密切相关。

灵活性综合评价表针对特定的运行状态,依据不同的灵活性资源响应,形成了对灵活性的综合评价,但评价表无法评价不同运行状态间或不同系统间的灵活性。因此,灵活性指标体系不仅应可观评价电力系统的运行灵活性的变化趋势,还应更直观地对现有电力系统的固有灵活性作出灵活性评价。

对于不同的运行状态或不同系统,若控制手段 i 包含所有的灵活性资源,研究对象 j 包含研究区域内所有的风电场,均可得到 2 个方向上的灵活性指标 $O_{+i,j}, O_{-i,j}$,它们可以评价特定方向上的灵活性。不区别方向时,对其进行简单的数学处理,得到:

$$E_i = \sqrt{O_{+i,j}^2 + O_{-i,j}^2}$$

(14)

E_i 值可作为系统固有灵活性的参考值。

通常而言,若需对比 2 个系统或 2 种运行状态下的固有灵活性,则需在同一时间尺度下考虑所有可用的灵活性资源时所得固有灵活性指标,作为评价依据。

固有灵活性的参考值与安全性指标、可靠性指标和经济性指标相似,可以为电力系统运行、规划方案提供依据和指导。

4 算例

本文采用 IEEE 30 节点测试系统的网架^[22],基准值为 $S_B=100\text{ MV}\cdot\text{A}$ 、 $U_B=135\text{ kV}$,以验证本文所建模型的有效性。在原始网架的基础上,本文添加了部分电源点,并对电源点的出力上、下限进行折算,电源点的参数如表 3 所示,其中,7、10 号节点接入了容量为 0.3 p.u.的风电场,分别记为风电场 1、风电场 2,1、22、9、18、23 号节点分别为火电、水电、可中断负荷、区域电网互联、储能系统的接入点,同时将各电源的上、下限折算至 10 min 时间尺度下,表中功率均为标么值。

表 3 电源基本参数
Table 3 Basic parameters of power sources

节点号	节点类型	P_{G0}	$P_{G,min}$	$P_{G,max}$
1	1	0.2354	0.2129	0.2579
2	2	0.6097	—	—
7	3	0.1000	—	—
9	1	0.0500	0.0400	0.0600
10	3	0.2000	—	—
13	4	0.3200	—	—
18	1	0.1000	0.0800	0.1200
22	1	0.1959	0.1609	0.2309
23	1	0.1420	0.1300	0.1500
27	4	0.2391	—	—

注:节点类型中 1—4 分别表示灵活性节点、平衡节点、风电场节点、普通节点。

利用文中所述模型,以向上灵活性指标为例,计算时间尺度为 10 min 的灵活性综合评价表。控制手段共 5 种:第一种为灵活性资源仅考虑火电,记为控制手段 I;第二种为灵活性资源考虑火电和水电,记为控制手段 II;第三种到第五种则在前一种控制手段中依次加入可中断负荷、区域电网互联、储能系统,并分别记为控制手段 III、控制手段 IV、控制手段 V。表 4 则为该情况下的灵活性评价表,表中数据均为标么值。

由表 4 可知,对于同一个研究对象,控制手段不同时,灵活性评价指标不同,在依次增加灵活性资源数量与种类时,电力系统灵活性指标会随之增加,增加的幅度与灵活性资源的种类密切相关。

对于同一种控制手段,研究对象不同时,灵活性指标与控制手段和研究对象均有较大关系。总体而言,当研究对象数量较多时,得到灵活性指标较大;

表 4 电源灵活性指标评价表
Table 4 Evaluation table of power source flexibility index

控制手段	灵活性指标		
	风电场 1	风电场 2	风电场 1+风电场 2
I	0.0224	0.0224	0.0224
II	0.0522	0.0403	0.0573
III	0.0569	0.0489	0.0629
IV	0.0577	0.0493	0.0837
V	0.0621	0.0552	0.0905

研究对象数量相同时,灵活性变化趋势与研究对象的个体相关性较强。

在灵活性资源数量较少时,潮流约束作用较小,灵活性资源出力限制约束占主导地位,因此,各类灵活性资源均可接近或达到其最大出力限制,此时控制手段 I 和 II 中,各情况下的灵活性指标差距较小,甚至出现相同的结果;而当灵活性资源数量逐渐增多时,潮流约束作用逐渐增强,各情况下的灵活性指标表现不一。特别地,灵活性资源越多,研究对象为 2 个风电场时的灵活性指标越接近研究对象为单个风电场时的灵活性指标之和。

为比较固有灵活性指标,本文计算了 IEEE 30 节点网架在不同负荷水平下,时间尺度为 10 min、控制手段为 V 时,研究对象为 2 个风电场时的双向灵活性指标与固有灵活性指标,如表 5 所示,表中数据均为标么值。

表 5 不同负荷水平下的固有灵活性评价
Table 5 Inherent flexibility evaluation for different load levels

运行状态	向下灵活性	向上灵活性	固有灵活性
中负荷	0.0963	0.0905	0.1321
高负荷	0.1047	0.0636	0.1225

由表 5 可知,中负荷时的向上灵活性远高于高负荷时的向上灵活性,但高负荷时的向下灵活性略高于中负荷时的向下灵活性,仅根据向上或向下灵活性无法判断哪种运行状态下的灵活性更高。因此,对比其固有灵活性可以看出,中负荷时系统的固有灵活性高于高负荷时系统的固有灵活性。该固有灵活性值仅是灵活性对比时的参考量。

5 结论

本文分析了现有灵活性指标的不足,着重考虑灵活性的特点,建立了具有明显物理意义的电源灵活性指标模型,适用于含可再生能源电站的电力系统。

基于电源灵活性指标模型,电源灵活性评价体系由灵活性评价表及固有灵活性指标组成,前者反映电力系统运行过程中的灵活性状态及变化趋势,后者则可以比较不同运行状态或不同电力系统间的电源灵活性。

IEEE 30 节点系统的算例表明,电力系统电源灵活性受到时间尺度、研究对象和控制手段等诸多因素的影响。本文所述的电源灵活性指标体系能够反映电力系统的电源灵活性,在一定程度上反映电力系统的整体灵活性,可为灵活性研究的进一步深入提供思路。但由于本文的研究以理论研究为主,研究对象为含可再生能源电站的电力系统,灵活性模型则仅从电源侧考量,在实际应用中则具有一定的局限性。

电力系统整体灵活性的评价不仅局限于电源侧,还可以从电网结构、负荷、电压和频率等角度评价灵活性,未来的研究将集中于从不同角度评价电力系统灵活性,从而形成更加完备的灵活性评价体系,以更好地服务于实际应用的需求。

参考文献:

- [1] 刘新东,江全元,黄志光,等. 计及不确定性的暂态稳定在线预测[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):75-81.
LIU Xindong,JIANG Quanyuan,HUANG Zhiguang,et al. On-line transient stability prediction considering uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(28):75-81.
- [2] 洪芦诚,石立宝,姚良忠,等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报,2010,25(8):116-122,130.
HONG Lucheng,SHI Libao,YAO Liangzhong,et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(8):116-122,130.
- [3] 孙伟卿,王承民,张焰,等. 采用柔性化方法表示刚性约束的电力系统优化模型[J]. 电网技术,2012,36(3):120-126.
SUN Weiqing,WANG Chengmin,ZHANG Yan,et al. A power system optimization model adopting flexible expression of rigid constraints[J]. Power System Technology,2012,36(3):120-126.
- [4] 白玉东,王承民,衣涛,等. 电力系统的柔性评价与风电穿透功率极限计算[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):112-116.
BAI Yudong,WANG Chengmin,YI Tao,et al. Flexibility assessment of power system and penetration limit calculation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(10):112-116.
- [5] North American Electric Reliability Corporation. Special report: accommodating high levels of variable generation[R]. Washington, USA:[s.n.],2009.
- [6] ADAMS J,O'MALLEY M,HANSON K. Flexibility requirements and potential metrics for variable generation;implications for system planning studies[M]. Princeton,NJ,USA:NERC,2010:14-17.
- [7] 张勇军,徐涛,许亮,等. 计及输电灵活性期望代价的多目标电网协调最优规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(24):31-35.
ZHANG Yongjun,XU Tao,XU Liang,et al. Multi-objective optimal coordinated transmission expansion planning considering flexibility expected expense[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(24):31-35.
- [8] AGENCY I E. Empowering variable renewables-options for flexible electricity systems[M]. Paris,France:OECD Publishing,2009:11-13.
- [9] MARRECO J D M,CARPIO L G T. Flexibility valuation in the Brazilian power system;a real options approach[J]. Energy Policy,2006,34(18):3749-3756.
- [10] 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(11):7257-7268.
- [11] LANNOYE E,FLYNN D,O'MALLEY M. The role of power system flexibility in generation planning[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,California,USA;IEEE,2011:1-6.
- [12] CAPASSO A,FALVO M C,LAMEDICA R,et al. A new methodology for power systems flexibility evaluation[C]//Proceedings of the Power Technology. St. Petersburg,Russia;IEEE,2005:27-30.
- [13] BOUFFARD F,ORTEGA-VAZQUEZ M. The value of operational flexibility in power systems with significant wind power generation[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,California,USA;IEEE,2011:1-5.
- [14] ULBIG A,ANDERSSON G. On operational flexibility in power systems[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,California,USA;IEEE,2012:22-26.
- [15] MA J,SILVA V,BELHOMME R,et al. Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[C]//2013 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PES). Vancouver BC,Canada;IEEE,2013:1-11.
- [16] LANNOYE E,FLYNN D,O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):922-931.
- [17] LANNOYE E,FLYNN D,O'MALLEY M. Assessment of power system flexibility;a high-level approach[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego,California,USA;IEEE,2012:1-8.
- [18] KAPLAN E L,MEIER P. Nonparametric estimation from incomplete observations[J]. Journal of the American Statistical Association,1958,53(282):457-481.
- [19] DENHOLM P,HAND M. Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity[J]. Energy Policy,2011,39(3):1817-1830.
- [20] LANNOYE E,MILLIGAN M,ADAMS J,et al. Integration of variable generation:capacity value and evaluation of flexibility[C]//2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Minneapolis,Minnesota,USA;IEEE,2010:25-29.
- [21] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [22] BUYGI M O,BALZER G,SHANECHI H M,et al. Market based transmission expansion planning;stakeholders desires[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation,Restructuring and Power Technologies,2004. (DRPT 2004). Hong Kong,China;IEEE,2004:433-438.

作者简介:



肖定垚

肖定垚(1990—),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事电力系统规划和电力系统经济运行方面的研究(E-mail:xiaorayson@163.com);

王承民(1970—),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力市场和电力系统经济运行方面的研究;

曾平良(1962—),男,四川成都人,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力系统优化运行。

(下转第139页 continued on page 139)

Proceedings of the CSEE,2003,23(3):16-19.

[15] 王海峰,丁杰. 对变电站内若干网络通信问题的探讨[J]. 电网技术,2004,28(24):65-68.

WANG Haifeng,DING Jie. Research on several issues of sub-station network communications[J]. Power System Technology, 2004,28(24):65-68.

[16] 邹玲,石坚,贺聿志. 网络设计与仿真方法的研究[J]. 计算机工程与应用,2000(6):129-132.

ZOU Ling,SHI Jian,HE Yuzhi. The study of network planning and simulation methodology[J]. Computer Engineering and Applications,2000(6):129-132.

作者简介:



刘晓胜

刘晓胜(1966—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为智能电网、电力系统通信、电力线载波通信;

海天翔(1989—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,主要研究方向为智能电网、电力系统通信(E-mail:haitianxiang9999@163.com);

徐殿国(1960—),男,黑龙江大庆人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为智能电网、电力电子技术。

Hot-standby communication of VLAN-based smart substation

LIU Xiaosheng¹,HAI Tianxiang²,ZHENG Jian³,ZHU Honglin¹,XU Dianguo¹
(1. School of Electrical Engineering and Automation,Harbin Institute of Technology, Harbin 150090,China;2. Beijing Electric Power Company,Beijing 100070,China;
3. State Grid Jiangxi Electric Power Company,Nanchang 330043,China)

Abstract: The real-time performance and security of process-level network communication in smart substation can be improved by the application of VLAN(Virtual Local Area Network) technology. A scheme of dual-switch communication with HSRP(Hot-Standby Router Protocol) is designed for the multi-switch communication to reduce the communication load of central switch and its mesh topology is compared with the star topology of single-switch communication in simulation and experiment,which show that,the central switch load of process-level network in the proposed scheme is obviously reduced and the standby switch can take over the corresponding data communication task when fault occurs in the link,which improves the reliability of smart substation communication network.

Key words: smart substation; hot-standby router protocol; OPNET; physical verification; virtual local area network; communication; reliability; switches

(上接第 125 页 continued from page 125)

Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty

XIAO Dingyao¹,WANG Chengmin¹,ZENG Pingliang²,SUN Weiqing³
(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240,China;2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China;
3. Department of Electrical Engineering,University of Shanghai for Science & Technology,Shanghai 200093,China)

Abstract: Flexibility is an important index to evaluate the ability of power system against the uncertainty. Aiming at the uncertainty caused by the renewable energy and based on the characteristic analysis of flexibility,a mathematic model with a comprehensive evaluation system is proposed to evaluate the source flexibility of power system. The source flexibility model considers the maximum mutation of renewable energy generation and divides the constraints into traditional constraints and source flexibility constraints. According to different control methods and objects,a flexibility evaluation table is built in the evaluation system to reflect the state,variation and trend of flexibility during power system operation. The inherent flexibility index is used to compare the flexibility among different operating conditions or power systems. Case analysis verifies the effectiveness of the proposed evaluation system.

Key words: renewable energy resources; electric power systems; flexibility; uncertainty; optimization; comprehensive evaluation table; inherent flexibility