

1-2-2019

Method of Power System Energy Storage Configuration Based on Flexibility Promotion

Weiqing Sun

1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China; ;

Li Zhen

1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China; ;

Yiming Tan

1.School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China; ;

Fenglei Lü

2.Dongying Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dongying 257000, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Method of Power System Energy Storage Configuration Based on Flexibility Promotion

Abstract

Abstract: To solve the problem of renewable energy access and aiming at system's response capability to short-term uncertainty, power system flexibility and its evaluation index are defined. A method of energy storage configuration based on flexibility evaluation is proposed. The uncertainty from power supply is analyzed. *Aiming at the uncertainty of renewable energy, a source flexibility evaluation index is defined. The principle and method of energy storage configuration are presented from the aspect of siting and sizing. The energy storage configuration model is created and solved considering both the system flexibility requirements and energy storage costs based on the evaluation of power flexibility.* Finally, case study on IEEE 118-bus test system shows that the proposed method is effective.

Keywords

renewable energy, uncertainty, flexibility promotion, energy storage configuration

Authors

Weiying Sun, Li Zhen, Yiming Tan, Fenglei Lü, Wenping Qiu, and Hongzhong Li

Recommended Citation

Sun Weiqing, Li Zhen, Tan Yiming, Lü Fenglei, Qiu Wenping, Li Hongzhong. Method of Power System Energy Storage Configuration Based on Flexibility Promotion[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 235-241.

基于灵活性提升的电力系统储能装置定容方法

孙伟卿¹, 李臻¹, 谈一鸣¹, 吕凤磊², 邱文平³, 李宏仲⁴

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 国网山东省电力公司东营供电公司, 山东 东营 257000;
3. 国网福建省电力有限公司南平供电公司, 福建 南平 353000; 4. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 为更好地解决可再生能源并网问题, 针对系统应对短时不确定性的响应能力, 定义电力系统灵活性及其评估指标, 并基于此提出一种储能优化配置方法。分析电源侧的不确定性, 定义电力系统灵活性, 针对可再生能源出力不确定性, 定义电源灵活性评估指标。从选址和定容的角度, 阐述储能配置的原理和方法, 并基于电源灵活性评价, 综合考虑系统灵活性需求和新建储能成本, 建立储能配置模型并求解。以 IEEE-118 节点测试系统验证方法的有效性。

关键词: 可再生能源; 不确定性; 灵活性提升; 储能配置

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0235-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801030

Method of Power System Energy Storage Configuration Based on Flexibility Promotion

Sun Weiqing¹, Li Zhen¹, Tan Yiming¹, Lü Fenglei², Qiu Wenping³, Li Hongzhong⁴

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;
2. Dongying Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dongying 257000, China;
3. Nanping Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Company, Nanping 353000, China;
4. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: To solve the problem of renewable energy access and aiming at system's response capability to short-term uncertainty, power system flexibility and its evaluation index are defined. A method of energy storage configuration based on flexibility evaluation is proposed. The uncertainty from power supply is analyzed. Aiming at the uncertainty of renewable energy, a source flexibility evaluation index is defined. The principle and method of energy storage configuration are presented from the aspect of siting and sizing. The energy storage configuration model is created and solved considering both the system flexibility requirements and energy storage costs based on the evaluation of power flexibility. Finally, case study on IEEE 118-bus test system shows that the proposed method is effective.

Keywords: renewable energy; uncertainty; flexibility promotion; energy storage configuration

引言

随着智能电网建设的不断推进, 可再生能源的并网规模迅速增大, 这在有效缓解当前能源短

缺和环境污染问题的同时也给电网安全稳定运行带来许多新的问题^[1]。

风力发电作为目前技术最成熟、经济效益最好的一种可再生能源发电方式得到广泛的应用, 风电并网规模占全网容量比重不断增加。但是, 风能受自然环境因素的影响较大, 存在较强的波动性、间歇性和随机性^[2], 使得原有常规电源对电网运行的调整和控制能力被削弱。与此同时, 风电出力的不确定性也对电网的调峰调频能力提



收稿日期: 2015-11-19 修回日期: 2016-02-29;
基金项目: 国家自然科学基金(51407117, 51777126);
作者简介: 孙伟卿(1985-), 男, 上海, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化; 李臻(1991-), 男, 山东, 硕士, 研究方向为电力系统安全分析; 谈一鸣(1993-), 男, 上海, 硕士, 研究方向为电力系统优化。

<http://www.china-simulation.com>

• 235 •

出了更高的要求^[3-5], 要求电网针对功率波动具备更加快速的响应和调节能力。所以, 现代电力系统必须具备足够的灵活性, 尽可能地消除或者是减小上述不确定因素对电力系统安全稳定运行带来的负面影响^[6-7]。

近年来, 众多学者普遍认为在风电场并网口添加储能装置来平滑其有功出力波动及提高风电调峰能力, 是解决当前风电场并网诸多问题的最有效手段^[8]。随着储能技术重要性的逐步显现, 以及储能设备制造成本的不断降低, 储能装置越来越多地应用到电力系统中^[9]。它不仅可以促进可再生能源的利用, 还可以有效地实现需求侧管理, 减小昼夜峰谷差, 平滑负荷的时间分布, 提高设备利用率, 推迟电网升级改造时间。此外, 电网级储能设备的应用还可以作为提高电力系统运行稳定性、调峰调频、快速响应系统各类不确定性因素的一种有效手段^[10-12]。

基于以上背景, 本文首先分析了电力系统中电源侧不确定性的来源, 其次定义电力系统多时间尺度电源灵活性评估指标, 然后结合储能设备优化选址和定容的方法, 提出一种基于灵活性提升的电力系统储能装置定容方法, 最后在IEEE-118节点测试系统上验证方法的有效性。

1 电力系统电源灵活性评估

如前文所述, 可再生能源发电具有间歇性、波动性和随机性等特点, 其大规模接入电网后, 必将加剧电源侧的不确定性^[13-14]。

除此之外, 随着电力市场化改革, 发-输-配电管理分离, 作为电力来源的发电公司在决定新建机组的容量、地点、投运时间等方面, 包括对于废旧机组的检修、更新换代上有着越来越大的自主权。他们的决策将更多地考虑经济因素, 而不是对电网安全性的整体影响。因此, 现代电力系统中的电源存在比以往更大的不确定性^[15]。

这些不确定性因素增加了电网调度和运行管理的难度, 也对电力系统响应和应对不确定性因

素的能力提出了比以往更高的要求。

北美电力可靠性委员会(NERC)和国际能源署(IEA)针对电力系统灵活性的概念, 给出了较为完整的定义。NERC认为, 电力系统灵活性是指利用系统资源满足负荷变化的能力, 主要体现于运行灵活性^[13]; IEA则认为, 电力系统灵活性是指在系统运行边界约束下, 快速响应供应和负荷的大幅波动, 对可预见不可预见的变化和事件迅速反应, 负荷需求减小时减小供应, 负荷需求增加时增加供应的能力^[14]。可见, IEA对电力系统灵活性的定义比NERC更为完善, 也更适用于本文所述考虑可再生能源出力不确定性的储能优化配置方法。

对于电力系统灵活性, 通常认为其具有以下3个特点^[16]: 1) 灵活性是电力系统的固有属性, 由系统的电源类型、容量、网络结构、负荷分布和负荷特性等诸多因素综合决定; 2) 灵活性具有方向性, 既要考虑可再生能源突增(或负荷突降)的情况, 此时灵活调节电源需快速减小出力, 称为“向下灵活性”; 也要考虑可再生能源突减(或负荷突增)的情况, 此时灵活调节电源需快速增加出力, 称为“向上灵活性”; 3) 时间尺度的选择是调用不同响应特性灵活性资源的重要依据, 因此灵活性需在一定时间尺度下进行评估。

在本文中, 定义一定时间尺度下电力系统中所有灵活调节电源和储能设备能够承受的风力发电功率变化的最大值为系统灵活性评估指标。

以响应风电场出力突增的系统“向下灵活性”评价指标为例, 其灵活性评估指标 FP_D 求解模型的目标函数为:

$$\max FP_D = \sum_{i=1}^{N_w} \Delta P_{wi} \quad (1)$$

式中: ΔP_{wi} 表示第*i*个风电场有功功率突增量; N_w 表示系统中风电场的数量。

考虑的约束条件包括: 风电场节点有功和无功功率平衡约束(2), 非风电场节点有功和无功功率平衡约束(3), 节点电压约束(4), 线路潮流约束

(5), 发电机有功无功出力约束(6)和(7), 以及发电机有功无功出力调节约束。

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

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

$$V_{k,\min} \leq V_k \leq V_{k,\max} \quad (4)$$

$$P_{k-j} \leq P_{k-j,\max} \quad (5)$$

$$P_{Gi,\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} \quad (6)$$

$$Q_{Gi,\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,\max} \quad (7)$$

$$P_{Gi}^0 - \Delta P_{Gi}^- \cdot t_{scale} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^+ \cdot t_{scale} \quad (8)$$

$$Q_{Gi}^0 - \Delta Q_{Gi}^- \cdot t_{scale} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^0 + \Delta Q_{Gi}^+ \cdot t_{scale} \quad (9)$$

式中, P_{Gk}, Q_{Gk} 分别表示节点 k 的有功和无功发电功率; P_{Lk}, Q_{Lk} 分别表示节点 k 的有功和无功负荷功率; ΔP_{wk} 表示节点 k 的风电有功功率变化量; $G_{kj}, B_{kj}, \theta_{kj}$ 分别表示节点 k, j 之间的电导、电纳和相角差; $V_k, V_{k,\max}, V_{k,\min}$ 分别表示节点 k 的电压及其上、下限; $P_{k-j}, P_{k-j,\max}$ 分别表示线路 $k-j$ 的有功潮流及其限值; P_{Gi}^0, Q_{Gi}^0 分别表示当前运行状态下灵活调节电源 i 的有功和无功功率出力; $\Delta P_{Gi}^+, \Delta P_{Gi}^-, \Delta Q_{Gi}^+, \Delta Q_{Gi}^-$ 分别表示灵活调节电源 i 的有功和无功功率向上和向下调节的最大速率。

根据灵活性评估所选取的评估对象、时间尺度 t_{scale} 及方向, 可求得相应的灵活性评价结果。

对于短时间尺度而言, 我国针对风电场制定了 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》^[17], 规定了 10 min 和 1 min 两个时间尺度下不同装机容量风电场有功功率变化的最大限值。

表1 GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定
Tab.1 GB/T 19963-2011 Standard on Connecting Wind Farms to Power System

风电场装机容量/MW)	10 min 有功功率变化最大限值/MW	1 min 有功功率变化最大限值/MW
<30	10	3
30~150	装机容量/3	装机容量/10
>150	50	15

因此在电力系统电源灵活性评估中, 可参照此国家标准选择 10 min 和 1 min 两个时间尺度, 评估以系统现有的灵活性水平, 是否能够满足风电场功率变化的最大允许值。

综上所述, 利用灵活性评价指标可以对电力系统的灵活性进行量化评估, 如果系统当前运行方式下灵活性评估的结果小于风电场功率波动预测值的上限, 就说明系统能够提供的灵活调节能力尚不足以完全满足极端情况下风电功率波动的灵活性需求, 必须采取一定的措施, 以提高系统灵活性。

在现有的提高系统灵活性的措施中, 新增储能设备无疑是一种投资周期短、见效快的调节手段。同时, 由于目前储能设备的建设成本较高, 使得储能设备的装机容量通常相对传统电源而言较小, 这一特点使得新增储能设备这一手段, 尤其适用于提高电力系统小时间尺度的灵活性。

2 储能布点和容量优化配置方法

根据上述分析, 为了应对电力系统的不确定性, 从储能布点和容量优化的角度, 对其进行优化配置。

2.1 储能优化布点与定容

储能装置布点位置的不同, 给投资者带来的效用也是不同的, 这取决于投资者配置储能装置的主要目的。长期以来, 有学者对不同应用场合下的储能装置优化模型进行研究, 其中根据应用场合的可以大致分为电网侧、用户侧和新能源侧 3 类。本文以减小甚至消除风电场有功出力不确定性为目标, 针对电网提出的灵活性需求, 将储能装置安装在新能源侧, 即风电场并网点。

对于有若干个风电场并网的电力系统来说, 在提高系统灵活性以达到既定的评估指标 FP_0 ^[15], 对系统新增储能容量进行优化, 优化目标函数为:

$$\min PS = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Gi}^s \quad (10)$$

其中, PS 表示系统新增储能功率; ΔP_{Gi}^s 表示节点 i 处新增储能功率。在时间尺度 t_{scale} 确定的情况下,

ΔP_{Gi}^s 与 t_{scale} 之积即为节点 i 处新增储能容量, PS 与 t_{scale} 之积即为系统新增储能总容量。由于 t_{scale} 为给定值, 因此新增储能容量与其功率成正比。

假设系统中共有 m 个并网的风电场, 系统新增储能功率为 PS_0 , 此时需要考虑风电场出口位置储能容量优化配置问题。储能配置原则主要包括集中配置和分散配置两大类。

所谓集中配置的储能功率优化分配模型为:

$$\Delta P_{WG,i}^s = \begin{cases} PS_0 & i = k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad i, k \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

从上述模型可以看出, 集中布置是在系统第 k 个风场并网口新增储能功率 $\Delta P_{WG,i}^s = PS_0$ 。

分散配置的储能优化分配模型如下:

$$\Delta P_{WG,i}^s = \alpha_i \cdot PS_0 \quad i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (12)$$

其中, α_i 为储能容量分配系数, 表示第 i 个风电场新增储能容量占系统新增储能容量的比重。显然, $\alpha_i \in [0, 1]$, 且满足:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1 \quad (13)$$

对于风电场储能容量分配系数 α_i 的确定原则, 又分为均匀分配和按风电场容量分配两类。均匀分配是将系统新增储能容量平均分配布置到系统所有风电场中, 故其分配系数 α_i 可以确定为:

$$\alpha_i = PS_0 / m \quad (14)$$

按风电场装机容量分配是指在分配系统储能容量时, 保证某个风电场分配到的储能容量 $\Delta P_{WG,i}^s$ 满足如下关系:

$$\alpha_i = \Delta P_{WG,i}^s / PS_0 = P_{Gi, \max} / \sum_{i=1}^m P_{Gi, \max} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, 风电场所分配到的储能容量 $\Delta P_{WG,i}^s$ 同该风电场的装机容量 $P_{Gi, \max}$ 呈正比关系。

本文从应对电网中风电场出力变化能力的角度出发, 以电网中风电场有功出力变化的最大值 $\Delta P_{Gi, \max}$ 作为灵活性需求目标, 对新增储能容量进行优化, 保证电力系统能够应对风电出力变化提出的任意灵活性需求。

进行系统储能功率优化的前提条件是风电有功出力变化大于系统原有的灵活性响应能力, 即满

足不等式(16); 否则, 即表示系统现有灵活性足以应对风电的最大可能变化。

$$FP_0 < FP = \sum_{i=1}^m \Delta P_{wi} \quad (16)$$

在满足系统安全稳定运行约束条件下, 对系统新增储能功率进行优化, 在灵活性评估时间尺度 t_{scale} 确定的前提下, 新增储能功率最小亦即新增储能容量最小, 即目标函数(10)。

同时, 优化得到的 PS 必须满足:

$$PS + FP_0 \geq FP \quad (17)$$

即系统新增与原有灵活性响应能力之和, 不小于既定的灵活性目标。

2.2 基于灵活性提升的储能定容模型

在定义灵活性评价指标的基础上, 若系统现有的灵活性响应能力不能满足安全稳定运行的要求, 则必须增加一定的灵活调节电源或储能设备。针对较长时间尺度下的风电功率变化, 由于功率变化的程度较大而速度较慢, 一般采用新增容量较大而建设成本较低的火电、水电等传统电源; 而针对短时间尺度下的风电功率变化, 由于功率变化的速度很快, 但持续时间较短, 一般采用新增储能装置的方法进行系统响应。

以短时间尺度下的灵活性优化为例, 说明储能的优化配置方法, 建立的优化模型如(18)所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & BESS = \sum_{i=1}^n \Delta P_{Gi}^s \\ \text{s.t.} \quad & P_{Gi} - \Delta P_{wi} + \Delta P_{Gi}^s - P_i = P_{Li} \\ & Q_{Gi} - Q_i = Q_{Li} \\ & FP \geq FP_0 \\ & \max \{P_{Gi, \min}, P_{Gi}^0 - \Delta P_{Gi}^- \cdot t_{scale}\} \leq P_{Gi} \leq \\ & \min \{P_{Gi, \max}, P_{Gi}^0 + \Delta P_{Gi}^+ \cdot t_{scale}\} \\ & \max \{Q_{Gi, \min}, Q_{Gi}^0 - \Delta Q_{Gi}^- \cdot t_{scale}\} \leq Q_{Gi} \leq \\ & \min \{Q_{Gi, \max}, Q_{Gi}^0 + \Delta Q_{Gi}^+ \cdot t_{scale}\} \\ & 0 \leq \Delta P_{wi} \leq \Delta P_{wi, \max} \\ & V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \\ & P_{i-j} \leq P_{i-j, \max} \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $\Delta P_{wi, \max}$ 表示国家标准规定的风电场出力变

化允许的最大值, 超出国标规定的情况不属于本文考虑的范畴, 模型中其余参数与约束条件(2)~(9)相一致。 FP_0 表示期望的灵活性指标。

优化目标函数为新增储能功率之和最小, 在时间尺度确定的情况下, 该函数等同于新增储能容量最小。若进一步假设新增储能投资成本与其容量成正比, 则此目标函数可以等效为新增储能设备的总投资最小。因此, 优化模型的含义为, 在满足期望的灵活性指标的前提下, 新增储能容量(或投资)最小。

储能配置方法的流程如图 1 所示。首先, 利用公式(1)~(9)所构造的评估模型, 对现有系统进行灵活性评估(上文以“向下灵活性”为例, 对应地还应评估“向上灵活性”), 若评估结果 FP_D 满足系统灵活性要求, 即系统现有灵活性水平能够满足对应国标所规定的可再生能源电场功率变化的最大允许值, 则无需新建储能设备; 否则, 设置期望的系统灵活性指标(该期望值可参照国标或该系统可再生能源电场出力的历史数据确定, 以满足“最坏情况”下的系统灵活性需求), 并调用

储能优化定容模型(18), 根据优化结果确定储能设备的容量, 输出方案结果。

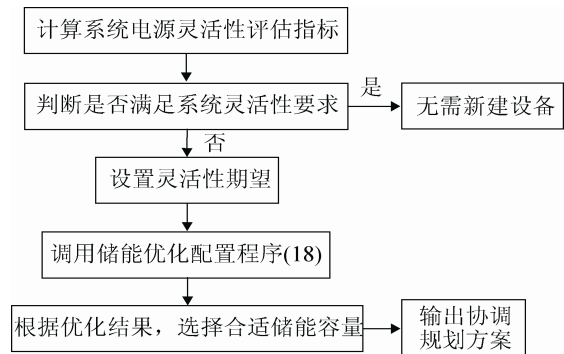


图 1 储能优化配置流程

Fig.1 Flow Chart of Optimal Energy Storage Configuration

3 算例分析

本文采用 IEEE-118 节点标准测试系统进行仿真计算。将该系统划分为西部、东北以及东南 3 个区域电网, 由于原系统中并没有风电场接入, 本文将原东北区域电网中的 5 个机组假设为风电场, 具体接入节点位置如图 2 所示。

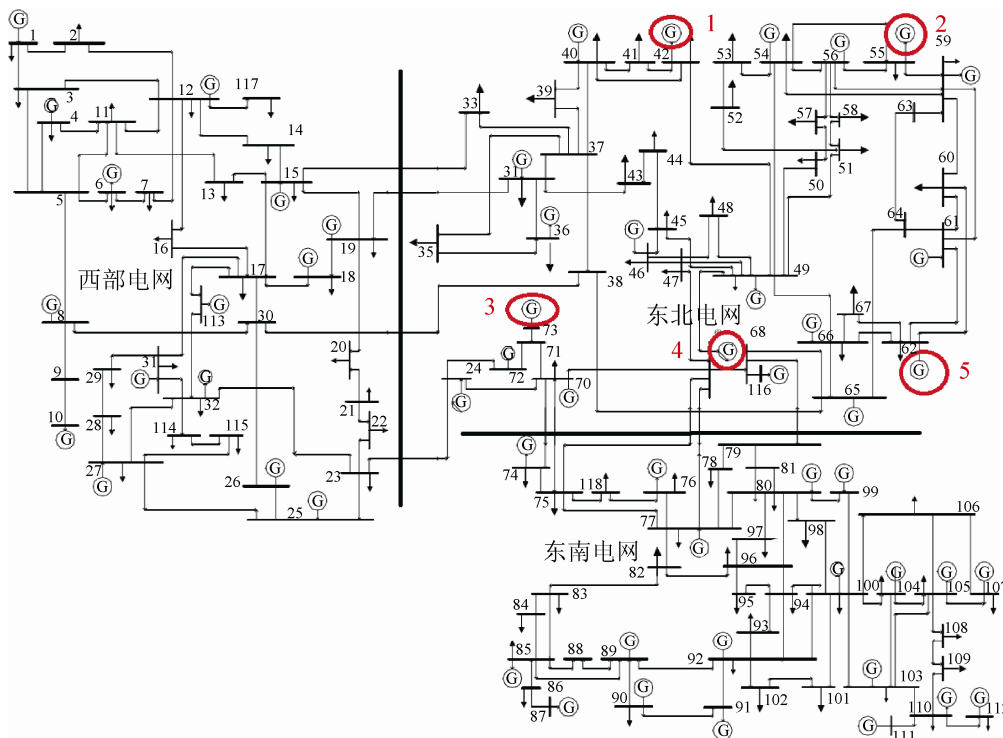


图 2 IEEE-118 节点测试系统接线图

Fig.2 Connection Diagram of IEEE 118-bus Test System

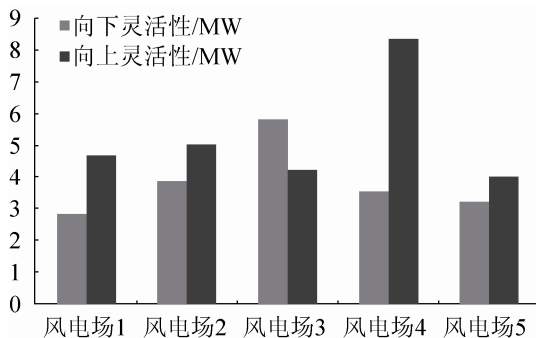
<http://www.china-simulation.com>

分别选取时间尺度 t_{scale} 为: 1 min, 10 min, 对系统进行向上和向下灵活性评估, 评估结果如表 2 所示。

表 2 IEEE-118 节点测试系统灵活性评估

评估指标	向下灵活性/MW		向上灵活性/MW	
	$t_{scale}=1 \text{ min}$	$t_{scale}=10 \text{ min}$	$t_{scale}=1 \text{ min}$	$t_{scale}=10 \text{ min}$
$ \Delta P_{w1} $	2.835	9.025	4.692	8.496
$ \Delta P_{w2} $	3.859	10.321	5.037	9.072
$ \Delta P_{w3} $	5.851	13.216	4.261	11.677
$ \Delta P_{w4} $	3.529	8.241	8.337	17.932
$ \Delta P_{w5} $	3.211	9.697	4.003	8.128
总和	19.285	50.500	27.330	55.305

在时间尺度取为 1 min 的情况下, 由于时间较短, 风电波动相对较小, 相应的系统所需的灵活性也较小。随着时间尺度的扩大, 风电变化程度加剧, 对系统灵活性需求也相应增加。1 min 时间尺度下的系统灵活性构成如图 3 所示。

图 3 系统灵活性构成($t_{scale}=1 \text{ min}$)Fig.3 Composition of System Flexibility ($t_{scale}=1 \text{ min}$)

由以上结果可知, 在 1 min 时间尺度下, 系统可承受较多的风电场 3 的功率突增量, 可承受较多的风电场 4 的功率突减量。

设置系统向上灵活性目标 $FP0=60 \text{ MW}$, 按照建立的优化模型得到系统新增储能如表 3。

由上可见, $t_{scale}=1 \text{ min}$ 时, 除了系统自身 27.33 MW 响应能力外, 还需系统新增储能容量 47.76 MW, 其中风电场 3 的新增容量最小, 只有 3.30 MW。这是因为风电场出力波动主要受装机容量

影响, 而风电场 3 的装机仅为 19 MW, 故其所需新增储能容量也相对较小。 $t_{scale}=10 \text{ min}$ 时, 系统新增储能容量减小至 13.96 MW, 这主要是因为系统在 10 min 时间尺度下灵活性响应能力较高, 为 55.305 MW, 从而降低对新增储能的需求。

表 3 新增储能容量

储能	$t_{scale}=1 \text{ min}$		$t_{scale}=10 \text{ min}$	
	功率/MW	容量/kWH	功率/MW	容量/kWH
1	10.96	182.67	0.15	2.50
2	10.64	177.33	0.67	11.17
3	3.30	55.00	0	0
4	12.84	214.00	7.94	132.33
5	10.02	167.00	5.20	86.67
总和	47.76	796.00	13.96	232.67

由于 $t_{scale}=1 \text{ min}$ 情况下系统自身缺乏灵活性资源, 因此增大对储能响应的依赖。同时 1 min 下的依赖程度要比 10 min 下的依赖程度高, 故在最后的储能协调规划方案中, 以对 $t_{scale}=1 \text{ min}$ 下的储能需求为规划目标。同时, 考虑到储能(蓄电池)单位容量因素, 假设单位储能装置的容量为 5 KWH, 对上述优化计算结果进行取整, 得到最终的储能配置方案如表 4 所示。

表 4 IEEE-118 节点测试系统储能配置方案

Tab.4 Energy Storage Configuration Scheme of IEEE 118-bus Test System

储能	功率/MW	容量/kWH	安装位置
1	11.1	185	风场 1 并网点
2	10.8	180	风场 2 并网点
3	3.3	55	风场 3 并网点
4	12.9	215	风场 4 并网点
5	10.2	170	风场 5 并网点
总和	48.3	805	/

由表 4 可见, 系统总计新增储能装置的功率和容量为 48.3 MW/805 kWh, 与现有实际系统中的电网级储能规模相当。

由图 4 可见, 风场 3 并网点处由于周边火电厂较多, 因此新增储能容量占比较小; 其余四处风场并网点新增储能容量大致相当。

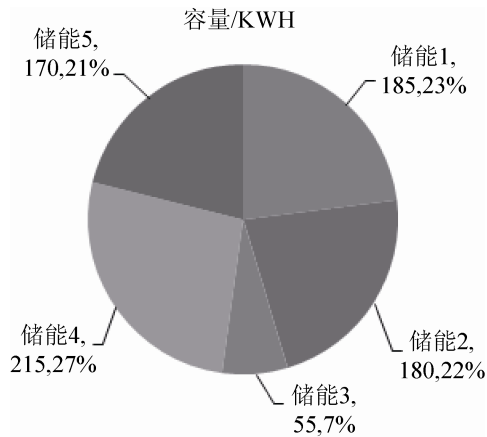


图 4 新增储能容量分布

Fig.4 Distribution of Increased Energy Storage Capacity

4 结论

本文提出一种用以提升系统灵活性的电力系统储能装置定容方法,该方法基于电源灵活性评估模型,从储能选址和定容的角度,求取一定灵活性期望值下的储能最优配置容量。试验表明,本文提出的方法和建立的模型是有效的,可以用尽可能少的储能装置投资满足系统灵活性需求。

本文所做的工作,可应用于可再生能源大规模并网环境下电力系统储能装置的优化配置。进一步的研究方向在于细化各种不同类型储能装置的协调匹配,以实现经济性和响应特性的综合最优。

参考文献:

- [1] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等. 计及风电功率不确定性的经济调度问题求解方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 125-130.
Zhang Z S, Sun Y Z, Li G J, et al. A solution of economic dispatch problem considering wind power uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 125-130.
- [2] 薛禹胜, 雷兴, 薛峰, 等. 关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5029-5040.
Xue Y S, Lei X, Xue F, et al. A Review on Impacts of Wind Power Uncertainties on Power Systems[J]. Proceedings of the Csee, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [3] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27-35.
Yan G G, Feng X D, Li J H, et al. Optimization of Energy Storage System Capacity for Relaxing Peak Load Regulation Bottlenecks[J]. Proceedings of the Csee, 2012, 32(28): 27-35.
- [4] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
Zhang L Y, Ye T L, Xin Y Z, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the Csee, 2010, 30(25): 1-9.
- [5] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
Chi Y N, Liu Y H, Wang W S, et al. Study on Impact of Wind Power Integration on Power System[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [6] Bouffard F, Ortega-Vazquez M. The value of operational flexibility in power systems with significant wind power generation[C]//Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting. San Diego California, USA: IEEE, 2011: 24-29.
- [7] Ulf Big A, Andersson G. On operational flexibility in power systems[C]// Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting. San Diego California, USA: IEEE, 2012: 22-26.
- [8] 沈枢, 张沛超, 李中豪, 等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12-18.
Shu S, Zhang P C, Li Zhonghao, et al. A Coordination Operation Method of Wind Power and Energy Storage Hybrid System for Smoothing Short-term and Long-term Wind Power Fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 12-18.
- [9] 肖白, 丛晶, 高晓峰, 等. 风电-抽水蓄能联合系统综合效益评价方法[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 400-404.
Xiao B, Cong J, Gao X F, et al. A method to evaluate comprehensive benefits of hybrid wind power-pumped storage system[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 400-404.
- [10] 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 C M, Sun W Q, 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.