储能参与电力系统快速调频的需求评估方法

樊海锋[1]，俞智鹏[2]，刘文龙[3]，徐春雷[1]，耿光超[3]
（1. 国网江苏省电力有限公司，江苏 南京 210024；2. 东南大学电气工程学院，
江苏 南京 210096；3. 浙江大学电气工程学院，浙江 杭州 310027）

摘　要：随着特高压直流建设和可再生能源发展，直流闭锁故障对电力系统快速调频提出了挑战。针对储能技术改善电力系统频率稳定性，提出了一种储能参与系统快速调频的需求评估方法。首先提出了电力系统快速调频的瓶颈评估指标和瓶颈场景分析方法，为储能容量配置提供了场景基础；接着又提出了基于瓶颈边界场景的储能容量优化配置方法，以最小化储能容量配置成本消除电力系统快速调频的瓶颈场景；最后基于江苏电网实际数据进行了算例分析，结果验证了所提出的需求评估方法的有效性。

关键词：储能；快速调频；需求评估；瓶颈
中图分类号：TM734　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096-3203(2019)02-0018-07

0　引言

因具有良好的经济、环境效益，可再生能源发电将会逐步取代常规机组，特别是燃煤火电机组。根据《江苏省“十三·五”能源发展规划》[1]，可再生能源装机占比将达到 17%左右。目前可再生能源发电如风电、光伏，主要采用最大功率点跟踪（maximum power point tracking，MPPT）运行方式，其有功控制与频率变化解耦[2—4]，不具备常规机组的惯性响应和一次调频，从而降低了系统调频对有功扰动的适应性。同时，江苏电网已投运多条特高压直流线路包括锡泰直流、锦苏直流[5—6]等，未来还将建设投运其他特高压直流，但直流线路发生闭锁故障时，电网将出现较大的有功缺额，系统频率稳定性将面临挑战[7—12]。基于上述两个因素，在多直流馈入和可再生能源发电不断发展的背景下，当系统发生较大扰动时（如直流线路闭锁），系统频率会出现快速跌落，若频率小于低频减载启动值，系统将自动切除部分负荷，降低了系统供电可靠性。因此，研究含多直流馈入和高渗透率可再生能源的电力系统的快速调频具有重要意义。

储能系统响应速率快、充放电灵活，可用于改善电力系统快速调频能力[13—19]。在较大扰动发生初期，储能快速提供有功功率支撑，可降低系统频率跌落速率和减少系统频率最大偏差，从而提高电力系统的频率稳定性。目前，有较多文献介绍储能快速调频的控制方法[20—26]，但储能参与系统快速调频的需求评估鲜有涉及，即系统快速调频的瓶颈分析和储能参与系统快速调频的容量配置。

基于上述问题，提出一种储能参与电力系统快速调频的需求评估方法。首先，分析电力系统快速调频的瓶颈场景，然后将以瓶颈最大的场景作为储能容量配置的场景基础，利用优化配置模型得到储能功率容量和能量容量，实现以最小化储能容量配置成本消除电力系统快速调频的瓶颈场景。此外，基于电力系统动态频率仿真模型，研究了储能参与电力系统快速调频的需求评估。

1　电力系统快速调频瓶颈分析

1.1　电力系统快速调频瓶颈评估指标

文中主要研究电力系统快速调频，即在发生较大扰动如直流闭锁、大机组故障、或负荷异常增加等情况下电力系统动态频率变化及其调整。在此过程中，主要考虑电力系统固有频率特性和一次调频特性，系统二次调频特性在文中暂不考虑。基于电力系统动态频率仿真模型[27]，得到系统动态频率差分化表达式，如式(1)—式(4)所示。

$$\Delta f^{t}=k_1\Delta f^{t-\Delta t}+k_2P_{\mathrm{u}}^{t-\Delta t} \tag{1}$$

$$k_1=\mathrm{e}^{-\frac{D_{\mathrm{L}}}{2H}\Delta t} \tag{2}$$

$$k_2=(1-\mathrm{e}^{-\frac{D_{\mathrm{L}}}{2H}\Delta t})/D_{\mathrm{L}} \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{u}}^{t-\Delta t}=-P_{\mathrm{loss}}+\Delta P_{\mathrm{G}}^{t-\Delta t}+\Delta P_{\mathrm{R}}^{t-\Delta t}+P_{\mathrm{s}}^{t-\Delta t} \tag{4}$$

式中：t 为时刻；Δt 为时间步长；Δf 为电力系统频率与额定值（50 Hz）之差；H 为电力系统等效惯性时间常数；D_{L} 为负荷调节效应系数；P_{u} 为系统总不平衡有功功率；P_{loss} 为系统扰动引起的有功功率损失；ΔP_{G} 为常规机组有功功率增量（相对扰动前平衡状

收稿日期：2018-09-11；修回日期：2018-11-13
基金项目：国家自然科学青年基金资助项目（51607155）；国家电网有限公司总部科技项目（J2019086）

态);ΔP_R 为风电、光伏等可再生能源发电有功功率增量(相对扰动前平衡状态);P_s 为储能系统有功功率(扰动前默认为零)。

当系统发生较大扰动时,电力系统动态频率变化典型曲线如图 1 中蓝线所示。扰动发生后,系统频率快速跌落,经一段时间后,频率达到最低点,然后系统频率开始恢复,进入频率恢复阶段。在频率跌落阶段,若系统频率低于低频减载启动阈值时,系统将自动切除一定比例负荷。在文中,将系统频率跌落至低频减载启动阈值以下的场景认定为电力系统快速调频的瓶颈场景。

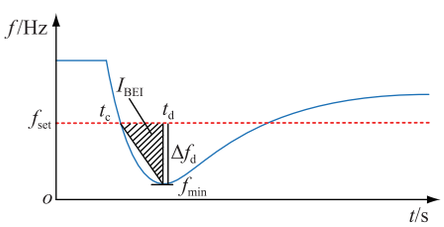


图 1 动态频率变化曲线和瓶颈评估指标示意图

Fig.1 The schematic diagram of dynamic frequency curve and bottleneck evaluation index

基于扰动后系统频率轨迹,结合频率越限时刻、最低点时刻和频率偏差情况,提出电力系统快速调频的瓶颈评估指标(bottleneck evaluation index, BEI),分析不同场景下电力系统快速调频的瓶颈,见图 1 中阴影面积,具体定义如式(5)—式(8)。

$$I_{BEI}=\frac{1}{2}(t_d-t_c)\Delta f_d \tag{5}$$

$$t_d=t_i\,|\,f^{t_i}=f_{min} \tag{6}$$

$$t_c=\min\{t_j\,|\,f^{t_j}\leqslant f_{set}\} \tag{7}$$

$$\Delta f_d=f_{set}-f_{min} \tag{8}$$

式中:t_c 为系统频率首次等于或低于低频减载启动阈值所对应的时刻;t_d 为系统频率到达最小值所对应的时刻;Δf_d 为在扰动发生后系统频率相对于启动阈值的最大偏差;f_{set} 为系统低频减载启动阈值;f_{min} 为扰动后系统频率最小值。

由瓶颈评估指标定义可知,I_{BEI} 越大,表示电力系统快速调频的瓶颈越大,反之,表示相应的瓶颈越小。通过分析不同场景的 I_{BEI},可方便确定出电力系统快速调频的瓶颈场景和瓶颈大小。

1.2 电力系统快速调频瓶颈分析

由式(1)—式(4)可知,电力系统快速调频主要受两个方面的影响:(1) 电力系统快速调频能力,主要取决于系统惯性、负荷调节效应和发电机组一次调频特性,与电力系统不同类型电源配比、运行方式有关;(2) 系统扰动引起的有功缺额大小,与扰动类型有关。考虑上述两种因素,研究电力系统不同场景,提出了基于瓶颈评估指标的电力系统快速调频瓶颈分析方法,其流程如图 2 所示。

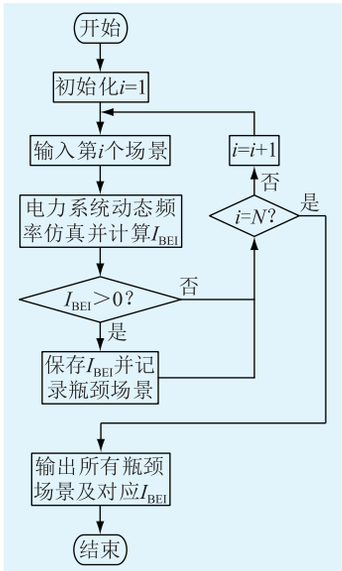


图 2 电力系统快速调频瓶颈分析流程

Fig.2 The flowchart of bottleneck analysis of power system in fast frequency regulation

具体步骤如下所示:

步骤 1:输入第 i 个场景,具体为电力系统不同类型电源配比、运行方式与扰动信息;

步骤 2:利用电力系统动态频率仿真模型,得到电力系统动态频率轨迹,并进一步计算对应的 I_{BEI};

步骤 3:判断 I_{BEI} 是否大于零,若是,则进入步骤 4;反之,进入步骤 5;

步骤 4:保存 I_{BEI} 并记录相应场景为瓶颈场景;

步骤 5:判断第 i 个场景是否为最后一个场景(图 2 中 N 为场景总数),若是,进入步骤 6;反之,更新场景,返回步骤 1;

步骤 6:输出所有瓶颈场景和相应 I_{BEI}。

通过上述步骤,可分析得到电力系统快速调频的瓶颈场景和瓶颈大小。对比分析不同瓶颈场景的 I_{BEI},将最大 I_{BEI} 所对应的瓶颈场景作为瓶颈边界场景,即为储能容量优化配置模型的边界条件。

2 基于瓶颈边界场景的储能容量优化配置

2.1 储能容量优化配置

储能容量配置包含了功率容量配置和能量容量配置。储能功率容量配置决定了频率跌落阶段储能最大出力能力,储能能量容量配置影响着储能快速调频支撑时长,两者对储能是否可以消除系统快速调频瓶颈、储能能量状态是否在合理范围和储能配置成本是否经济具有重要意义。储能功率容量配置若过小,则不能完全消除所识别的瓶颈场

景;若过大,则储能配置成本较高。储能能量容量配置若过小,则储能在快速调频过程中易发生过放现象;若过大,则储能配置成本较高。基于瓶颈边界场景的储能容量配置,利用储能改善系统快速调频能力,将 I_{BEI} 降低为零从而达到消除瓶颈的作用,同时避免储能发生过放现象。考虑储能运行约束、系统动态频率特性和快速调频瓶颈约束,建立了基于瓶颈边界场景的储能容量优化配置模型,如式(9)—式(15)所示,得到用于消除电力系统快速调频瓶颈的最优储能功率容量和能量容量。

(1) 目标函数。考虑储能功率容量和能量容量的单位成本,目标函数设置为最小化储能参与快速调频的容量配置成本,如式(9)所示。

$$\min \alpha P_{ess} + \beta E_{ess} \tag{9}$$

式中:P_{ess} ,E_{ess} 分别为储能所需要配置的功率容量和能量容量;α ,β 分别为单位功率、单位能量成本。

(2) 储能运行约束。在文中储能参与系统快速调频,采用模糊逻辑控制方法[24]。根据系统频率偏差及其变化率,结合模糊逻辑控制策略,实时调整储能有功功率,如式(10)所示。

$$P_s^t = h\left(\frac{\mathrm{d}\Delta f}{\mathrm{d}t}\Big|_t, \Delta f^t\right) P_{ess} \tag{10}$$

式中:$h(\,)$ 为储能参与快速调频的模糊逻辑控制策略,其输出量为储能参与快速调频的有功出力比例,范围为[0,1];$\mathrm{d}\Delta f/\mathrm{d}t$ 为系统频率偏差变化率。

同时,为了延长储能使用寿命,储能荷电状态(state of charge, SOC)需要维持在合理运行范围内,如式(11)、式(12)所示。

$$S_{SOC}^t = S_{SOC,o} - \sum P_s^t \Delta t/(E_{ess}\eta) \tag{11}$$

$$S_{SOC,l} \leqslant S_{SOC}^t \leqslant S_{SOC,u} \tag{12}$$

式中:S_{SOC}^t 为储能荷电状态,用于表征储能能量状态;$S_{SOC,o}$ 为储能荷电状态初始值;η 为储能充放电效率;$S_{SOC,u}$,$S_{SOC,l}$ 分别为储能荷电状态的上下限。

(3) 系统动态频率特性约束。系统动态频率特性约束主要包括系统固有频率特性约束和发电机组一次调频特性约束。因可再生能源发电采用MPPT运行,故不具备一次调频能力,同时系统扰动后短时间内可认为风速、光照等条件基本不变,则式(4)中 ΔP_R 等于零,进而结合式(1)—式(4)可得系统固有频率特性约束,如式(13)所示。常规机组一次调频特性约束,如式(14)所示。

$$\Delta f^t = k_1 \Delta f^{t-\Delta t} + k_2(-P_{loss} + \Delta P_G^{t-\Delta t} + P_s^{t-\Delta t}) \tag{13}$$

$$\Delta P_G^t = g(\Delta f^{t-\Delta t}, x_G^t, x_G^{t-\Delta t}) \tag{14}$$

式中:$g(\,)$ 为常规机组一次调频特性(由其调速器和原动机动态特性决定)[27];x_G 为常规机组调速器和相应原动机的状态变量集合。

(4) 系统快速调频瓶颈约束。电力系统动态频率轨迹需要满足快速调频需求,即相应瓶颈得到消除。

$$I_{BEI} = 0 \tag{15}$$

2.2 模型求解

因为式(10)所示的储能模糊逻辑控制策略具有非线性和式(14)所示的常规机组一次调频动态模型中调速器模型存在限制环节,储能容量优化配置模型具有较强的非线性。采用粒子群算法求解所建立的模型,在式(9)中引入惩罚项,将储能荷电状态约束(12)和快速调频瓶颈约束(15)加入到目标函数,当系统瓶颈不能消除或储能荷电状态不在合理运行范围内时,原目标函数将增加较大的数,当系统瓶颈得到消除且储能荷电状态维持在合理运行范围内时,原目标函数将增加零。改进的目标函数如式(16)所示。

$$\min \alpha P_{ess} + \beta E_{ess} + \gamma \sum \max\{S_{SOC,l} - S_{SOC}^t, 0\} + \delta \sum \max\{S_{SOC}^t - S_{SOC,u}, 0\} + \lambda \max\{I_{BEI}, 0\} \tag{16}$$

式中:γ,δ,λ 为惩罚因子,数值均取较大的正常数。

储能容量优化配置模型求解流程如图3所示,具体步骤如下:

步骤1:输入电力系统快速调频瓶颈边界场景;

步骤2:初始化粒子群,得到每个粒子的初始位置和速度;

步骤3:计算每个粒子的适应度函数值即优化配置模型的目标函数值;

步骤4:比较每个粒子的适应度函数值,并得到粒子的局部最优位置和全局最优位置;

步骤5:判断是否满足终止条件,具体为迭代次数是否达到最大值或相邻两代全局最优值偏差是否小于预设阈值。若满足,返回粒子的全局最优位置即优化模型最优解;反之,进入步骤6;

步骤6:根据粒子的全局最优位置和局部最优位置,更新新一代粒子的位置和速度,返回步骤3。

3 算例分析

3.1 测试算例

以江苏电网的实际数据为算例,进行仿真分析。截至2017年12月,该电网总装机容量为109.8 GW,不同类型机组的装机容量如图4所示,其中,可再生能源装机容量占比约12.9%。该电网通过3条

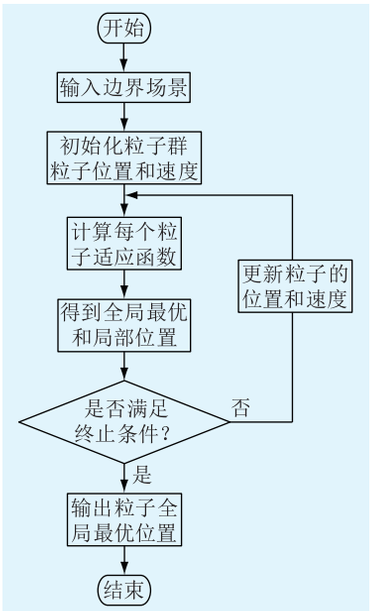


图 3　模型求解流程

Fig.3　The flowchart of model solution

±800 kV、1 条±500 kV 直流联络线和 4 回 1 000 kV、10 回 500 kV、2 回 220 kV 交流联络线与省外电网相连。设置该电网低频减载启动阈值为 49.5 Hz。在单一机组故障、风电场脱网等扰动下,系统频率难以跌落至 49.5 Hz,因此在文中系统扰动主要考虑直流线路闭锁。假设在第 5 s 时,某一条直流线路闭锁,电网外来电失去有功 5 700 MW。

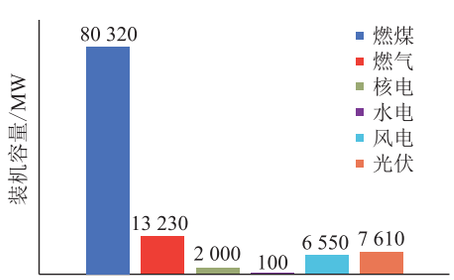


图 4　不同机组装机容量

Fig.4　The configuration of generators

3.2　系统快速调频瓶颈分析

考虑风电和光伏等可再生能源发电将逐步替代常规机组,可再生能源渗透率定义如式(17)所示,并设置不同的可再生能源渗透率,分别为 15%,20%,25%,35%,40%。

$$p = \frac{\sum S_{G,i}}{S} \times 100\% \quad i \in R \tag{17}$$

式中:p 为可再生能源的渗透率;S 为系统总装机容量;$S_{G,i}$ 为第 i 台被替代常规机组的容量;R 为被替代常规机组的集合。

3 种典型负荷时段即峰值、均值、谷值对应的负荷分别为 96 214 MW,87 818 MW,77 050 MW。在不同负荷时段,电力系统运行方式有所不同,从而在线机组的备用容量和爬坡能力将会有所差异。

考虑直流线路闭锁扰动(失去有功 5 700 MW),结合不同可再生能源渗透率和不同负荷时段所对应的运行方式,组合生成 18 个电力系统运行场景,用于分析电力系统快速调频瓶颈。根据文中提出瓶颈场景分析方法,可得出不同场景的 I_{BEI},如图 5 所示,得到 15 个瓶颈场景。其中,对于峰值负荷时段,可再生能源渗透率从 15% 到 40% 所对应的 I_{BEI} 分别为 0,0,0,0.001 9,0.011 1,0.024 3。当可再生能源渗透率高于 25% 时,I_{BEI} 大于零,即系统将出现快速调频瓶颈。

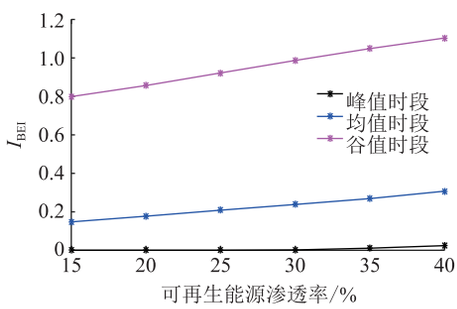


图 5　不同场景的 I_{BEI}

Fig.5　I_{BEI} of different scenarios

在图 5 所示瓶颈场景中,对于相同负荷时段,随着可再生能源渗透率提高,瓶颈指标 I_{BEI} 不断增大,如在均值负荷时段,I_{BEI} 从 0.148 变化到 0.307,由此可得,可再生能源渗透率提升加大了电力系统快速调频瓶颈。对于相同可再生能源渗透率,随着负荷总量减小,电力系统运行方式发生变化,在相同备用率下,系统在线备用减小和爬坡能力下降,从而系统快调调频能力变弱,面对相同扰动时,瓶颈指标 I_{BEI} 会增大,如可再生能源渗透率为 30% 时,峰值、均值、谷值时段所对应的瓶颈指标 I_{BEI},分别为 0.002,0.238,0.987。由此可得,在系统备用率相同的情况下负荷总量下降加大了电力系统快速调频瓶颈。

3.3　储能容量配置分析

文中待选型的储能,考虑目前两种主流的电化学储能(锂电池、铅炭电池),其技术经济参数[28],如表 1 所示。储能荷电状态初始值设置为 0.9。储能荷电状态上下限分别设置为 0.9,0.1。

由图 5 可知,当可再生能源渗透率达到 40% 且系统处于谷值负荷时段时,系统快速调频瓶颈最大,故将以此场景作为边界场景,用于储能容量优化配置。边界场景下系统频率变化如图 6 中黑色虚

表 1 不同储能技术经济参数

Table 1 Technical and economic parameters of different ESSs

类型	充放电效率 η/%	单位功率成本 α/(元·kW^{-1})	单位能量成本 β/[元·(kW·h)$^{-1}$]
磷酸铁锂电池	90	1 000	2 500
铅炭电池	84	1 000	1 000

线所示。根据频率变化曲线可到,对应的瓶颈评估参数 t_c , t_d , Δf_d 大小分别为 7.5,17.7,0.216 4,进而由式(5)可得边界场景的 BEI 大小为 1.103 6。根据所提出的配置方法,磷酸铁锂电池和铅炭电池储能配置结果,如表 2 所示。为了消除系统快速调频瓶颈,系统需要配置 1 662.4 MW/24.1 MW·h 的磷酸铁锂电池或1 662.4 MW/25.9 MW·h 的铅炭电池。虽然铅炭电池能量容量需求较大,但因其单位能量成本较低,故在功率容量需求和单位功率成本相同情况下,铅炭电池配置成本小于磷酸铁锂电池配置成本,即系统配置 1662.4 MW/25.9 MW·h 的铅炭电池更经济。

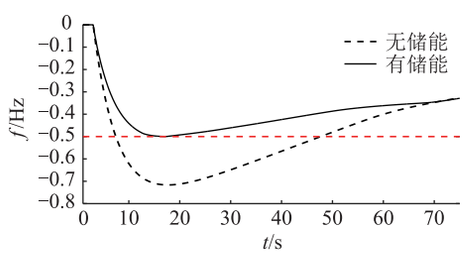


图 6 有无储能时系统频率变化曲线

Fig.6 The curve of system frequency with ESS or not

表 2 不同储能配置结果

Table 2 Configuration of different ESSs

类型	功率容量/MW	能量容量/(MW·h)	配置成本/元
磷酸铁锂电池	1 662.4	24.1	1.73×10^9
铅炭电池	1 662.4	25.9	1.69×10^9

对于 1 662.4 MW/25.9 MW·h 的容量配置,图 6、图 7、图 8 分别展示了在瓶颈边界场景下储能参与快速调频时系统频率变化、储能功率变化、储能 S_{SOC} 变化情况。由图 6 可知,在储能快速调频作用下,系统频率动态频率均在−0.5 Hz 以上,此时 I_{BEI} 为零,即瓶颈边界场景的瓶颈得到消除。由图 7 和图 8 可知,在储能快速调频过程中,储能随着系统频率变化实时调整其有功出力,同时又可实现储能 S_{SOC} 在 0.1~0.9 之间变化,满足 SOC 运行要求。由此可得,文中储能配置结果,既可以消除系统快速调频瓶颈又可以实现储能 SOC 维持在合理运行范围内。

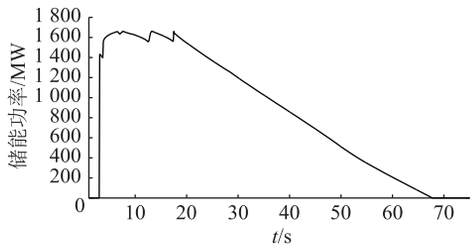


图 7 储能功率曲线

Fig.7 The power curve of energy storage system

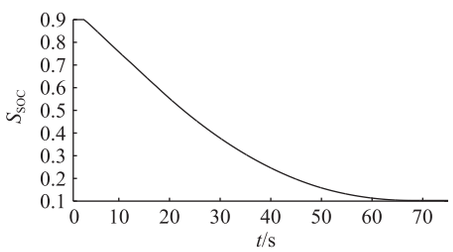


图 8 储能 SOC 变化曲线

Fig.8 The SOC curve of energy storage system

4 结语

提出了一种储能参与电力系统快速调频的需求评估方法,分析了储能参与系统快速调频的必要性和容量配置的合理性。仿真分析结果表明:

(1) 通过对不同可再生能源渗透率和负荷时段分析,所提出瓶颈分析方法可有效确定系统快速调频的瓶颈场景和瓶颈大小;

(2) 所提出储能容量配置方法,对储能功率、能量容量配置具有技术经济性,既可以优化储能配置成本,又可以消除系统快速调频瓶颈和实现储能 SOC 在合理运行范围内变化。

参考文献:

[1] 江苏省政府办公厅. 关于印发江苏省“十三·五”能源发展规划的通知:苏政办发[2017]62 号[A/OL]. (2017-05-22)[2018-08-30]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2017/5/22/art_46484_2557495.html.
General Office of Jiangsu Provincial Government. Circular on issuing Jiangsu Province's 13th five-year plan for energy development: soviet political office issued No. 62 [A/OL]. (2017-05-22) [2018-08-30]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2017/5/22/art_46484_2557495.html.

[2] 李建林, 杨水丽, 高凯. 大规模储能系统辅助常规机组调频技术分析[J]. 电力建设, 2015, 36(5): 105-110.
LI Jianlin, YANG Shuili, GAO Kai. Frequency modulation technology for conventional units assisted by large scale energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2016, 35(5): 105-110.

[3] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 储能参与风电一次调频的容量优化[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(5): 23-42.

MIAO Fufeng, TANG Xisheng, QI Zhiping. Capacity optimization of energy storage participating to wind plant primary frequency regulation [J]. Power System Protection and Control, 2016, 35(5): 23-42.

[4] 严干贵, 王昱博, 钟诚, 等. 风储联合系统调频控制策略研究[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 55-60.
YAN Gangui, WANG Yubo, ZHONG Cheng, et al. Frequency control strategy for wind storage combined system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 55-60.

[5] 管永高, 张诗滔, 徐文超. 特高压直流分层接入方式下层间交互影响研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 32-37.
GUAN Yonggao, ZHANG Shitao, XU Wenchao. Study on hierarchical interaction of UHVDC hierarchical connection mode [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 32-37.

[6] 卫鹏, 刘建坤, 周前. 锦苏直流闭锁后重启动过程的故障反演[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 51-56.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Analysis on a blocking event and restart of Jinping-Sunan UHVDC Transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(11): 51-56.

[7] 李虎成, 袁宇波, 卞正达, 等. 面向特高压交直流大受端电网的频率紧急控制特性分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 27-31.
LI Hucheng, YUAN Yubo, BIAN Zhengda, et al. The frequency emergency control characteristic analysis for UHV AC/DC large receiving end power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 27-31.

[8] 李兆伟, 吴雪莲, 庄侃沁, 等. "9·19"锦苏直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析及思考[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 149-155.
LI Zhaowei, WU Xuelian, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis and reflection on frequency characteristics of east China grid after bipolar locking of "9 · 19" Jinping—Sunan DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 149-155.

[9] 童凯,宣佳卓,许烽,等. 浙江电网特高压直流输电工程保护闭锁策略[J]. 浙江电力,2018,37(2):31-35.
TONG Kai, XUAN Jiazhuo, XU Feng, et al. Protection locking strategy of Zhejiang UHVDC transmission project[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 31-35.

[10] 刘伟华, 李虎成, 袁宇波, 等. 大规模源网荷友好互动系统实切试验技术[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 1-6.
LIU Weihua, LI Hucheng, YUAN Yubo, et al. The actual load shedding verification test technology of large-scale "source-grid-load" friendly interactive system introduction[J]. Electric Power Construction, 2017, 36(6): 1-6.

[11] 谢成,金涌涛,胡叶舟,等. 基于相关系数分析的配电网单相接地故障研判方法与试验研究[J]. 浙江电力,2017,36(3):17-23.
XIE Cheng, JIN Yongtao, HU Yezhou, et al. Diagnosis and experimental research on single-phase-to-earth fault of distribution networks based on correlation [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(3): 17-23.

[12] 韩冰, 姚建国, 於益军, 等. 负荷主动响应应对特高压受端电网直流闭锁故障的探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 1-6.
HAN Bing, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Discussion onactive load response at receiving end power grid for mitigating UHVDC blocking fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 1-6.

[13] 胡泽春, 丁华杰, 宋永华, 等. 能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 8-17.
HU Zechun, DING Huajie, SONG Yonghua, et al. Research status and prospect of energy storage application under energy internet background[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 8-17.

[14] 苏小林, 李丹丹, 阎晓霞, 等. 储能技术在电力系统中的应用分析[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 24-32.
SU Xiaolin, LI Dandan, YAN Xiaoxia, et al. Application analysis of energy storage technology in power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 24-32.

[15] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review ofwind power ontegration control with energy storage technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.

[16] 张静炜,朱想,赫卫国,等. 考虑光伏发电和储能系统调压能力的配电网储能容量优化配置[J]. 广东电力,2018,31(7):30-35.
ZHANG Jingwei, ZHU Xiang, HE Weiguo, et al. Optimized configuration for ESS capacity of distribution network considering voltage regulation ability of photovoltaic generation and ESS[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 30-35.

[17] 唐西胜. 储能在电力系统中的作用与运营模式[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 2-7.
TANG Xisheng. Applications and marketing mode of energy storages in power system[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 2-7.

[18] 林琳,马超,王朋. 基于储能电量控制的交直流混合微网实时经济调度方法[J]. 智慧电力,2017,45(9):1-6.
LIN Lin, MA Chao, WANG Peng. Real-time economic dispatching method of AC/DC hybrid microgrid based on energy storage electric quantity control[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 1-6.

[19] 张祥,周博文. 微网储能系统的模糊控制策略研究[J]. 智慧电力,2018,46(4):16-21.
ZHANG Xiang, ZHOU Bowen. Research on fuzzy control strategy of microgrid energy storage system[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 16-21.

[20] STORE D-I, KNAP V, SWIERCZYNSKI M, et al. Operation of a grid-connected lithium-ion battery energy storage system for primary frequency regulation: a battery lifetime perspective [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53

(1): 430-438.

[21] WU L, CUI Z, GAO W, et al. A novel frequency regulation strategy with the application of energy storage system for large scale wind power integration[C]//Green Technologies Conference. IEEE,2015.

[22] SEBASTIAN R. Application of a battery energy storage for frequency regulation and peak shaving in a wind diesel power system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 764-770.

[23] KNAP V, CHAUDHARY S K, STROE D-I, et al. Sizing of an energy storage system for grid inertial response and primary frequency reserve[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3447-3456.

[24] TORRES L M A, LOPES L A C, MORÁN T L A, et al. Self-tuning virtual synchronous machine: a control strategy for energy storage systems to support dynamic frequency control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 833-840.

[25] PULENDRAN S, TATE J E. Energy storage system control for prevention of transient under-frequency load shedding [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 927-936.

[26] LIU Ju, WEN Jinyu, YAO Wei, et al. Solution to short-term frequency response of wind farms by using energy storage systems[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 669-678.

[27] 龚裕仲, 江全元, 汪海蛟. 考虑电网频率偏差的风电功率爬坡限制指标动态优化[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2377-2384.
GONG Yuzhong, JIANG Quanyuan, WANG Haijiao. Dynamic optimization of wind power ramp limitation based on power system frequency deviation[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2377-2384.

[28] 王思渊, 江全元, 葛延峰. 考虑风电爬坡事件的储能配置[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1093-1100.
WANG Siyuan, JIANG Quanyuan, GE Yanfeng. Optimal configuration of energy storage considering wind ramping events [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1093-1100.

作者简介:


樊海锋

樊海锋(1987),男,硕士,工程师,从事调度自动化及储能应用工作(E-mail:fhfxa2006@126.com);

俞智鹏(1994),男,硕士在读,研究方向为电力电子化电力系统;

刘文龙(1991),男,博士在读,从事新能源并网与储能技术应用工作。

A demand assessment approach of energy storage for participating in fast frequency regulation of power system

FAN Haifeng[1], YU Zhipeng[2], LIU Wenlong[3], XU Chunlei[1], GENG Guangchao[3]

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co.,Ltd.,Nanjing 210024,China;2. School of Electrical Engineering,Southest University,Nanjing 210096,China;3. College of Electrical Engineering Zhejiang University,Hangzhou 310027,China)

Abstract: With UHVDC construction and renewable energy development, DC blocking faults bring challenge to fast frequency regulation of power system. To improve frequency stability of power system with energy storage technology, a demand assessment method is proposed for energy storage to participate in fast frequency regulation of power system. Firstly, bottleneck evaluation index and bottleneck scenario analysis method of fast frequency regulation are proposed to acquire scenario basis for capacity configuration of energy storage. Then an optimal configuration method on capacity of energy storage is proposed based on bottleneck boundary scenario, which eliminates bottleneck scenarios with the minimum cost of capacity configuration of energy storage. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified via case studies based on actual data of Jiangsu grid.

Keywords: energy storage; fast frequency regulation; demand assessment; bottleneck

(编辑 钱悦)