新型储能与能

# 储能电站安全参与电网一次调频的优化控制策略

### 张嘉诚,夏向阳,邓子豪,陈贵全

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:为安全实现储能系统对电网准确快速调频,对于系统频率偏移引起的有功率需求,提出一种考虑 荷电状态(state of charge, SOC)、健康状态(state of health, SOH)的储能辅助调频自适应优化控制策略, 该策略依据储能单元实时状态决定多组储能单元参与电网一次调频的最优投切情况,在频率变化初期多组 储能单元考虑健康状态共同出力,减小频率恶化程度;在频率恢复期,考虑各储能单元自身荷电状态、健 康状态,在保证储能调频效果的同时,使各储能单元均处于健康工作状态,提高了储能系统的安全性和经 济性。最后搭建了区域电网一次调频模型,通过阶跃和连续扰动验证了策略的有效性。

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202102028

#### 0 引言

随着社会经济的发展,风力、光伏等新能源 技术快速发展<sup>[1-2]</sup>,大规模储能系统因其配置灵 活、响应速度快,能够较好地保证新能源供电的 平衡性和连续性<sup>[3-5]</sup>。储能技术作为智能电网领域 中关键的组成部分,其发挥的作用越来越重要<sup>[6-8]</sup>。 国家以及地方关于储能方面的政策频频出台,并 且发展储能有效带动了地方经济增长,储能技术 迎来了高速发展期<sup>[9]</sup>。为了保证电网在不同扰动 下的安全稳定,大规模储能在电网调频中的应用 是当今研究热点<sup>[10-14]</sup>。

目前,国内外学者对参与电网一次调频的储 能电站控制策略进行了大量研究。文献 [15] 建立 了符合调频需求的储能电池模型,提出储能调频 输出功率调节模式,并体现了相比传统机组的优 势。文献 [16] 在下垂控制中采用恒定的下垂系 数,没有考虑电池荷电状态(state of charge, SOC)对储能输出功率的影响。当前针对大规模 储能电站辅助电网调频的研究多采用定系数法, 连续负荷扰动可能使储能单元产生过充过放现 象,进而发生不可控安全事故,考虑经济性,当 前电池储能成本较高,对电池控制不当会影响储 能系统长时间可持续发展。文献 [17-18] 均考虑到 电池 SOC,分别提出变系数下垂控制与自适应下 垂控制,更好地调整电池出力。文献 [19] 为缓解 扰动初期频率恶化程度,新增虚拟惯性控制,但 配合下垂控制仅设置时间延迟,一次调频效果略 有不足。现有研究都是将储能系统看作一个整体 进行能量调度,没有考虑健康状态(state of health, SOH)对电池充放电的影响,缺少对储能系统内 部结构的考虑,而实际工程中储能电站是由多组 电池簇并联组成。

综上所述,本文充分考虑电池储能结构特点 及关键状态参数,针对当前储能电站参与电网一 次调频的不足,提出一种考虑储能单元 SOC、 SOH 及多储能单元组优先投切问题并融合虚拟惯 性和可变下垂控制的综合控制策略,在传统虚拟 惯性控制基础上引入健康因子,根据 SOH 调整出 力深度;在估计电池 SOC、SOH 的同时,引入储 能单元组优先投切判据,根据各储能单元状态进 行优先排序;以频率变化率的死区作为控制策略 的切换点,在可变下垂控制的基础上增加 SOH 变 量。通过提出的控制策略来控制储能单元组的投 切出力,在保证快速响应电网一次调频的同时也 保证了储能电站运行的经济性和安全性。

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-07-20。

**基金项目**:国家自然科学基金资助项目(柔性直流输电交流侧故障下换流器多桥臂主动应对的能量调控机理及穿越 控制研究,51977014)。

## 1 储能电站参与电网一次调频方法

新型储能与俞

源转化

大型储能电站的储能单元组数量较多,常规储能电站拓扑如图1所示。



#### 图 1 储能电站并网结构示意 Fig. 1 Illustration of energy storage power station into the grid

本文将2种控制策略相结合,虚拟惯性控制 一般在负荷扰动初期产生作用,此时频率变化率 较大,仅靠下垂控制无法快速降低频率变化率, 虚拟惯性控制可快速阻止电网频率恶化且减小最 大频率偏差。但考虑储能容量问题,惯性控制不 能长时间作用,在阻止频率恶化后,采用下垂控 制继续调频,在兼顾储能荷电状态和健康状态的 同时减小频率稳态误差。考虑到储能电站的经济 性和安全性,基于储能单元 SOC、SOH 的估算, 对各个储能单元组进行运行状态评判,对各储能 单元进行合理的投切。含储能系统的电网一次调 频模型可以等效为图2所示的动态模型。

其中, s为拉氏算子; KG为传统发电机组的





单位调节功率;  $T_{G}$ 、 $T_{CH}$ 、 $T_{RH}$ 分别为传统发电机 组的调速器时间常数、汽轮机时间常数、再热器 时间常数;  $F_{HP}$ 为再热器增益;  $\Delta P_L(s)$ 为负荷扰动 量;  $\Delta P_B(s)$ 为储能系统出力;  $\Delta P_t^d(s)$ 为虚拟惯性控 制出力;  $\Delta P_t^I(s)$ 为虚拟下垂控制出力; M为电网 惯性时间常数; D为负荷阻尼系数。

根据以上分析,本文策略在扰动初期频率变 化率大时采用引入健康因子的虚拟惯性控制以减 缓频率恶化速度及恶化程度;在渡过频率恶化期 后采用系数可变的下垂控制并结合 SOC、SOH 估 计对各储能单元组进行优先级排序,响应电网频 率波动时,将优先级高的储能单元组投入工作既 能保证调频效果又能保证储能电站的经济性和安 全性。在调频死区外,当频率偏差 $\Delta f > 0(\Delta f < 0)$ 时,若频率偏差率d $f_t/dt > 0(df_t/dt < 0)$ 则启动虚拟 惯性控制,所有储能单元同时出力,迅速阻止频 率进一步恶化,若频率偏差率d $f_t/dt < 0(df_t/dt > 0)$ 则启动下垂控制,根据各储能单元 SOC、SOH 对 储能变流器 (power conversion system, PCS)选择 投切,2种控制相互配合最终实现频率的快速 恢复。

#### 2 储能电站参与电网一次调频的控制策略

#### 2.1 改进储能系统虚拟惯性控制

为维持电网稳定运行,中国一般规定电网频 率偏移为0.2~0.5 Hz或者-0.5~-0.2 Hz<sup>[20]</sup>,惯性控 制在短时内提供大功率支撑电网,可有效缓解频 率变化陡度,改进虚拟惯性响应可表示为

$$\Delta P_{it} = \begin{cases} 0, & \frac{\mathrm{d}f_t}{\mathrm{d}t} < R_s \\ G_t \frac{\mathrm{d}f_t}{\mathrm{d}t}, & \frac{\mathrm{d}f_t}{\mathrm{d}t} \ge R_s \end{cases}$$
(1)

式中:  $\Delta P_{it}$ 为 t 时刻第 i 组储能单元的虚拟惯性响 应值;  $G_t$ 为改进虚拟惯性系数;  $df_t/dt$ 为 t 时刻的 频率变化率;  $R_s$ 为虚拟惯性控制调频死区。虚拟 惯性控制在短时间作用,对电池的荷电状态影响 较小,因此不考虑 SOC 变化对其输出功率的影响。

因传统虚拟惯性控制可有效抑制频率扰动初 期的恶化程度,但是由于维持虚拟惯性控制需要 储能单元输出大功率支撑,循环多次会加速电池 老化。本文引入健康因子的概念,结合考虑电池 SOH 来调整储能系统惯性出力,改进虚拟惯性系数为

$$G_t = G_0 G_{\rm H} \tag{2}$$

$$G_{\rm H} = 1 - \left(\frac{S_{\rm OH,t} - S_{\rm OH,max}}{S_{\rm OH,min} - S_{\rm OH,max}}\right)^2$$
(3)

式中: G<sub>0</sub>为固定惯性系数; G<sub>H</sub>为关于 SOH 的健 康因子; S<sub>OH,t</sub>为电池 t 时刻健康状态; S<sub>OH,max</sub>和 S<sub>OH,min</sub>为电池健康状态上下限,分别为 1.0, 0.8。

综上可知,改进的储能电站虚拟惯性控制在 电网频率波动初期,通过引入健康因子,所有储 能单元根据各自 SOH 调整出力深度,实现储能电 站向电网持续快速地注入有功功率,并有效延缓 电池容量衰减速度。

#### 2.2 基于电池状态估计的优先顺序指标

大规模储能电站的储能单元分为若干组,分 别经由PCS并联,在实现调频效果的同时也应考 虑电池储能的经济安全性,为此,本文在对 SOC、SOH估计的情况下,进而对各个储能单元 组的动作优先顺序进行分级排序,按照确定的优 先顺序选择储能单元组投入工作。

现应用工程一般使用安时积分法进行 SOH 状态估计,但该方法没有考虑电池多次循环后内部材料的退化、计算损耗等问题,需要频繁进行校准。由此,本文加入一种新的 SOC 和 SOH 估计策略,基于电池二阶电路模型,对电池电压的测量值和计算值之间进行实时比较,结合 PI 控制器,提供更准确的状态估计值。

总体的估算框图如图 3 所示,其中,V(t)和 *i*(t)为 ESS 实际运行过程中测得的电压电流。然后







将V(t)与电路模型 $V_{model}(t)$ 提供的值进行比较,并 由 PI1 控制器进行放大,提供一个校正项 $\Delta E_0$ ,用 于估计空载电压 $E_0$ 。根据厂家提供数据表的关系  $S_{OC}(E_0)$ 来估计 $S_{OC}$ ,再将其与采用库仑计数法得 到的 $S_{OC}$ 进行比较,经过 PI2 放大误差,输出  $\Delta V_{Ri}$ 作为被用作充电和放电期间模型内阻输出的 校正因子,在 $S_{OC}$ 值偏低时, $\Delta V_{Ri}$ 表示内部电阻  $R_i$ 的增量。

S<sub>OH</sub>的估计方法有多种,本文中S<sub>OH</sub>计算表示 为实际容量C<sub>cap</sub>与额定容量C<sub>n</sub>的比率。

$$C_{\text{cap}} = f[Q(i(t)), \Delta E_0(t)]$$
(4)

$$S_{\rm OH} = C_{\rm cap}/C_n \tag{5}$$

**]型储能**。

式中: Q表示为一段时间内电流的时间积分;  $t = [t_1, t_2]; \Delta E_0(t)$ 为开路电压。

$$Q[t_1, t_2] = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt$$
 (6)

可以在不延时的情况下估计Ccap,即

$$C_{\rm cap} = \frac{mQ[t_1, t_2]}{E_{0, t_1} - E_{0, t_2}} \tag{7}$$

计算得到储能电池关键参数 S<sub>OC</sub>、S<sub>OH</sub>的值 后,为了更好地控制储能单元组的投切,本文引 入考虑储能单元 S<sub>OC</sub> 及 S<sub>OH</sub>的优先排序工作策 略。大规模储能电站在连接方式上选用串并联方 式成簇,因此,对储能单元组进行优先排序控制 能够最大限度地发挥储能电站的潜力。优先排序 的计算式为

$$K = \begin{cases} -(\alpha S_{\text{OC},i} - \beta S_{\text{OH},i}) & \Delta f < 0\\ \alpha S_{\text{OC},i} + \beta S_{\text{OH},i} & \Delta f > 0 \end{cases}$$
(8)

式中: K为优先系数;  $S_{OC,i}$ 、 $S_{OH,i}$ 分别为第i组储 能单元实时荷电状态、健康状态;  $\alpha$ 、 $\beta$ 为权重系 数,  $\alpha$ : $\beta$ =1:2。

根据优先排序计算式得到各储能单元的优先 系数,如图4所示,优先系数K越大,储能单元 组动作优先级别越高;反之,储能单元组动作优 先级别越低。若 $\Delta f < 0$ ,储能系统吸收电网功 率,则优先选择实时 $S_{OC}$ 较小的储能单元组;若  $\Delta f > 0$ ,储能系统释放功率支撑电网,则优先选择 实时 $S_{OC}$ 较大的储能单元组,充放电2种情况均 优先考虑 $S_{OH}$ 更好的储能单元。

为方便下垂系数的修订,依据储能单元 Soc

将其荷电状态进行划分, S<sub>OC,max</sub>、S<sub>OC,max-s</sub>、 S<sub>OC,min-s</sub>、S<sub>OC,min</sub>分别为储能单元组的正常工作上限、稳定工作上限、稳定工作下限和正常工作下限。



图 4 储能单元优先排序示意 Fig. 4 Schematic diagram of energy storage unit prioritization

#### 2.3 基于 S<sub>OC</sub>、S<sub>OH</sub>的储能系统可变下垂控制

储能电站辅助调频的下垂控制是在下垂特性 的基础上根据频率偏差控制储能系统的有功输 出,从而稳定电网频率。传统频率下垂控制策 略为

$$\Delta P_t = R_t \Delta f = R_t (50 - f_t) \tag{9}$$

在传统下垂控制的基础上加入 S<sub>OC</sub>、S<sub>OH</sub> 2 个 变量实现下垂系数可变,并且结合对多组 PCS 的 优先投切控制,实现对电网频率偏差控制以及使 储能单元维持在健康状态。

充放电工况不同 $S_{OC}$ 、 $S_{OH}$ 值对下垂系数影响为 $R_t = R_{st}R_{ht}$  (10)

$$R_{\rm ht} = \frac{1 - \exp[S_{\rm OH,min} - S_{\rm OH,t}]}{1 + \exp[S_{\rm OH,min} - S_{\rm OH,t}]}$$
(11)

(1) 电池充电工况。

当S<sub>OC</sub> ∈ [0,S<sub>OC,min</sub>]时,储能电池电量充足, 故不考虑荷电状态系数以最大化保证调频效果, 计算式为

$$R_{\rm st} = R_{\rm max} \tag{12}$$

$$R_{\rm st} = R_{\rm max} - \frac{S_{\rm OC,t} - S_{\rm OC,min}}{S_{\rm OC,min-s} - S_{\rm OC,min}} (R_{\rm max} - R_{\rm nom}) \quad (13)$$

当
$$S_{OC}$$
 ∈ [ $S_{OC,min-s}$ , $S_{OC,max-s}$ ] 时, 计算式为  
 $R_{st} = R_{nom}$  (14)

当
$$S_{OC} \in [S_{OC,max-s}, S_{OC,max}]$$
时,计算式为  
 $R_{st} = \frac{S_{OC,t} - S_{OC,max-s}}{SOC, max - S_{OC,max-s}} R_{nom}$  (15)

(2) 电池放电工况。

当
$$S_{OC} \in [S_{OC,min}, S_{OC,min-s}]$$
时, 计算式为
$$R_{st} = \frac{S_{OC,t} - S_{OC,min}}{2} R_{nom}$$
(16)

当
$$S_{OC} \in [S_{OC,max-s}, S_{OC,max}]$$
时, 计算式为  
 $R_{st} = R_{max} + \frac{S_{OC,t} - S_{OC,max-s}}{S_{OC,max} - S_{OC,max-s}} (R_{max} - R_{nom})$  (18)

当S<sub>OC</sub> ∈ [S<sub>OC,max</sub>,1]时,储能电池电量不足,故系数取最大值保证快速恢复储能电量,计算 式为

$$R_{\rm st} = R_{\rm max} \tag{19}$$

式中: *R*<sub>st</sub>、*R*<sub>ht</sub>分别为*t*时刻荷电、健康下垂系数; *R*<sub>max</sub>、*R*<sub>nom</sub>分别为最大下垂系数和常规下垂系数; *S*<sub>OC,t</sub>、*S*<sub>OH,t</sub>分别为储能单元*t*时刻的荷电状态和健康状态值。

所提改进下垂控制策略根据不同 S<sub>OC</sub>、S<sub>OH</sub>实时计算下垂控制系数来控制储能单元输出功率大小。当电网频率波动时,储能单元根据自身状态动态调节出力大小,在保证电网频率需求的同时尽可能使储能电池处于健康安全的状态。

## 3 储能电站参与一次调频的综合控制策略

#### 3.1 调频综合控制策略

在上文讨论的控制策略中,各控制的动作时 机和动作效果都不相同,为优化储能电站的调频 效果及保持储能单元状态,提出的优化控制策略 如图 5 所示。以Δ*f*>0,即储能系统需要释放功率 支撑电网为例。

(1)储能系统实时监测电网频率*f*,以及各储 能单元的*S*<sub>OC</sub>、*S*<sub>OH</sub>,参考国内关于调频偏差死区 的标准,调频死区*f*<sub>d</sub>=0.033 Hz。当实时电网频率 与参考电网频率差值大于*f*<sub>d</sub>时,进入下一步判 断,否则循环监视。

(2)当Δf>0且频率变化率为负(df<sub>t</sub>/dt<0),</li>
 若频率变化率的绝对值超过了虚拟惯性控制死区
 R<sub>s</sub>,此时虚拟惯性控制启动,所有储能单元按照式(1)计算出力,同时响应电网一次调频。

(3)当频率偏差达到最大,即(df<sub>t</sub>/dt=0),
 此时进入频率恢复阶段时,虚拟惯性控制闭锁。



#### 图 5 储能电站参与一次调频的综合控制策略 Fig. 5 Integrated control strategy for primary frequency regulation of energy storage power station

(4) 启动下垂控制之前,根据监测得到的 S<sub>OC</sub>、S<sub>OH</sub>值以及式(8) 对各储能单元进行优先 级排序,将优先系数大的储能单元投入运行,优 先系数大则代表该储能单元的S<sub>OC</sub>及S<sub>OH</sub>在所有 储能单元中均处于良好状态。在此基础之上投入 运行的储能单元采用系数可变的下垂控制进行有 功功率输出以恢复电网频率。

储能电站充电(Δ*f*<0)时的控制策略和上述过 程类似。

#### 3.2 调频评价

为了评价储能系统运用本文策略参与电网一 次调频的效果,在分析幅频特性的基础上得出时 域评价指标。

在阶跃负荷扰动的工况下,提出 4 个关键评价指标, $\Delta f_s$ 为扰动后的稳态频率偏差,代表调频的最终效果, $\Delta f_m$ 为最大频率偏差,代表对扰动的抑制效果; $t_s$ 为调频完成时间,代表储能系统整体响应速度, $t_m$ 为调频峰值时间,代表储能惯性响应的支撑速度,其值均越小越好。

在连续负荷扰动的工况下,主要将频率偏差 和荷电状态偏差的均方根值作为一次调频的评价 指标,以此来反映一次调频效果和储能单元的电 量健康。

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (f_t - f_0)^2}$$
(20)

新型储能与能 ) 翰侬美健战别

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (Q_{\text{SOC}_{t}} - Q_{\text{SOC}_{\text{ref}}})^2}$$
(21)

式中: *f<sub>t</sub>为 t* 时刻电网实时频率; *Q*<sub>SOCt</sub>为 *t* 时刻储 能单元实时荷电量; *f*<sub>0</sub>为参考频率,设为 50 Hz; *Q*<sub>SOC\_ref</sub>为参考荷电量,设为 0.5; *f*、*Q*分别代表 频率指标和荷电状态指标。

#### 4 仿真验证

本文所提控制策略以搭建区域模型为基础, 模拟储能电站结构加入多组储能单元进行仿真 验证。

系统额定频率为 50 Hz,包括1台额定容量为 100 MW 的传统火电机组,3组储能单元并联组成 额定容量为 3.15 MW/6.33 (MW·h)的储能系统,其 额定电压为 380 V,系统仿真示意如图 6 所示,参 数标幺值是以额定频率 50 Hz 和传统机组额定容 量作为基准值。为了说明本方法的适用性,以 2 种不同工况进行分析说明。

#### 4.1 阶跃负荷扰动工况

假设在阶跃负荷扰动中A、B、C3组储能单



图 6 系统仿真示意 Fig. 6 System diagram for simulation

元的初始 S<sub>OC</sub> 分别为 0.9、0.85、0.75,当电网正常运行时,加入幅值为 0.015 标幺值的阶跃扰动,对比在本文控制策略、定 K 系数控制法和无储能3 种不同策略下电网频率恢复情况以及各储能单元荷电状态变化情况,结果如图 7 所示。

由图 7 a)可知,因惯性控制作用,本文方法 相较其他 2 组方法对于扰动初期的频率恶化程度 抑制效果明显,无储能下降斜率最大,其次是定 K法。相较于无储能来说定 K 法的频率最大偏差 较小,由于定 K 法全程采用固定功率对电网进行 调频,其储能系统因电量快速被耗尽而过早停止 运行。本文提出的控制策略在频率偏差及频率偏 差率超过惯性控制和下垂控制的调频死区时, 2 种控制策略分别作用,使得系统的最大频率偏 差、频率下降斜率均最小。为延长电池使用寿命 以及考虑储能电站安全性、经济性,采用下垂法 控制电池放电时,考虑 3 组储能单元的剩余电 量,优先将处于充电饱和区域的 A 组储能单元投 入系统运行,其余单元组暂时停止工作。

由图 7 b) 可知, 在频率变化初期虚拟惯性控





Fig. 7 Simulation results of system response under step disturbance

制3组储能单元同时投入运行;频率偏差达到最 大值时,虚拟惯性控制闭锁启动下垂控制,考虑 运行工况及各储能单元状态,经式(8)计算, A组储能单元优先级最高投入运行,B、C2组暂 停工作,经过1个周期重新判定,C组仍不参与 调频,A组切除,B组储能单元投入运行,如此 往复,最终达到1次调频效果。3组储能单元 Soc以均衡的趋势下降且均处于健康工作区内。 本文综合策略相较其他方法有明显优势,在大规 模储能应用中,能更好地发挥储能潜力,保持电 池容量。

调频评价指标如表1所示,由表1可以看 出,在阶跃负荷扰动工况下,本文方法有效减小 了最大频率偏差和最终的稳态误差,且到达稳态 误差的时间更短。

表 1 阶跃负荷扰动评价指标 Table 1 Evaluation index of step load disturbance

方法	$\Delta f_{\rm m}$	t <sub>m</sub> /s	$\Delta f_{ m s}$	$t_{\rm s}/{\rm s}$
无储能	-0.145	5.12	-0.082	29.52
定K法	-0.11	9.21	-0.082	29.32
本文方法	-0.08	6.02	-0.063	16.01

#### 4.2 连续负荷扰动工况

储能参与电网调频作用时间较短,为了使仿 真结果更加明显,体现本文控制策略的作用效 果,故将A组储能单元初始Soc设为临界充电状 态 0.9,B组Soc设为0.6,C组Soc设为临界放电 状态 0.2。因为储能辅助电网一次调频主要是应对 较小幅度的负荷扰动,通常约为负荷峰值的1%, 因此,本文假设连续负荷的变动平均幅值为 1%~3%。

连续负荷扰动曲线如图 8 a) 所示。不同控制 策略下电网频率偏差曲线如图 8 b) 所示,本文所 提控制方法下 3 组储能单元 Soc 变化曲线如 图 8 c) 所示,评价指标如表 2 所示。

由图 8 b)可知,在连续负荷扰动下,本文所 提控制策略对比无储能和采用下垂定 K 法,频率 偏差的情况明显降低,更好的保障电网安全稳定 运行。由图 8 c)可知,由于 A 组储能单元处于临 界放电状态,相较于 B 组放电功率更大, S<sub>OC</sub> 下 降更快,C 组处于临界充电状态,在系统功率缺 额时不参与工作,仅在系统功率过剩时投入工





Fig. 8 Simulation results of system response under continuous disturbance

表 2 连续负荷扰动评价指标 Table 2 Evaluation index of continuous load disturbance

方法	频率指标	Soc指标
无储能	0.2632	
定K法	0.2358	0.3054
本文方法	0.2025	0.2538

作,避免电池出现过放情况,最终各储能单元组 的荷电状态均向健康的工作状态变化。对比其他 单一储能单元的控制方法,本文方法考虑实际工 况,更适用于工程应用,避免电池过充过放情况 发生的同时也达到了较好的调频效果,验证了本 文控制策略的有效性。

**所型储能与能** 

由表 2 中数据可以看出,连续负荷扰动工况 下无储能调频效果最弱,本文策略略优于定 K法,并且对于Q指标,本文所提方法考虑电池 状态对出力深度的影响,仿真结果显示较好。由 于大量新能源发电并网,电网频率扰动的次数更 加频繁,储能调频更应在安全的前提下利用好本 身能量转换的优势。

#### 5 结论

运用本文所提控制策略,在电网需要时提供 必要的功率输出,目前所提调频策略中,并未考 虑其结构中电池簇并联运行的实际情况。在调频 效果相当的情况下,把延长电池使用寿命作为切 入点进行研究就显得尤为重要,本文研究重点也 在于此。通过仿真也验证了其有效性。

(1)本文提出的综合控制策略考虑了储能电站内部储能单元的并联运行结构,在估计各个储能单元*S*<sub>OC</sub>、*S*<sub>OH</sub>的基础上,对多组储能单元进行投切控制,在保证对电网调频效果的同时,使电池尽量处于安全工作区域中。

(2)所提方法的适用性较好,无论是在阶跃 扰动还是连续扰动下,都能使电网频率快速的回 归到稳态偏差,保证了电网频率的稳定性。

(3)在频率变化初期,为了防止频率进一步 恶化,所有储能单元同时参与虚拟惯性控制共同 出力,频率偏差变化率下降至惯性控制死区外 后,根据各储能单元状态进行优先级排序,启动 下垂控制,配合各储能单元进行调频。充分发挥 储能电站多储能单元并列运行的优势。

#### 参考文献:

- 张旻, 彭梦妮, 夏向阳, 等. 新能源电动汽车参与电网频率控制研究 [J]. 中国电力, 2017, 50(8): 173–178.
   ZHANG Min, PENG Mengni, XIA Xiangyang, *et al.* Study on the control of new energy electric vehicles participating freguency regulation of the grid[J] Electric Power, 2017, 50(8): 173–178.
- [2] 夏向阳, 孔祥霁, 帅智康, 等. 基于磁集成结构 DC-DC 变换器的超级电容储能系统 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11): 95–99.

Equipment| Electr Power Autom Eq, 2014, 34(11): 95-99.

新型储能与能

- [3] 赵昕昕,夏向阳,曾小勇,等.基于混合粒子群优化的混合储能直流 电源系统 [J]. 中国电力, 2019, 52(5): 104-112.
   ZHAO Xinxin, XIA Xiangyang, ZENG Xiaoyong, *et al.* Hybrid energy storage DC power supply system based on PSO-NM[J] Electric Power. 2019, 52(5): 104-112.
- [4] ZHU D W, ZHANG Y J A. Optimal coordinated control of multiple battery energy storage systems for primary frequency regulation[J].
   IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 555–565.
- [5] STROE 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.
- [6] 赵晏强,周伯柱,仇华炳.国际储能关键技术竞争态势 [J]. 科技促进发展, 2017, 013(10): 745–751.
  ZHAO Yanqiang, ZHOU Bozhu, QIU Huabing. The trends of energy storage technology[J]. Science & Technology for Development, 2017, 013(10): 745–751.
- [7] 李建林, 崔宜琳, 王含, 等. 十四五储能典型政策解析 [J]. 电器与能效管理技术, 2020, 595(10): 11–16.
  LI Jianlin, CUI Yilin, WANG Han, *et al*, Analysis of typical policies for energy storage in the 14 th five-year plan[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020, 595(10): 11–16.
- [8] 徐国栋, 王坚嵘, 石一峰, 等. 电池储能电站安全问题分析与对策
  [J]. 电力安全技术, 2020, 22(9): 60–63.
  XU Guodong, WANG Jianrong, SHI Yifeng, *et al*, Analysis and countermeasures for safety problems of battery energy storage power stations[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(9): 60–63.
- [9] 张军,张伟,曹凌捷,等.国内储能市场发展现状及趋势分析 [J].电 力与能源, 2020, 41(6): 739–743.

ZHANG Jun, ZHANG Wei, CAO Lingjie, *et al.* Analysis of the development of energy storage market and the key development direction in China[J]. Power & Energy, 2020, 41(6): 739–743.

[10] 李建林, 靳文涛, 惠东, 等. 大规模储能在可再生能源发电中典型应 用及技术走向 [J]. 电器与能效管理技术, 2016(14): 9–14,61.
LI Jianlin, JIN Wentao, HUI Dong, *et al.* The typical application and technology trend of large- scale energy storage in renewable energy generation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(14): 9–14,61.

- [11] CHOI J W, HEO S Y, KIM M K. Hybrid operation strategy of wind energy storage system for power grid frequency regulation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3): 736–749.
- [12] CANEVESE S, GATTI A, MICOLANO E, et al. Battery energy storage systems for frequency regulation: simplified aging evaluation[C]// 2017 6 th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). Santa Margherita Ligure, Italy. IEEE, 2017: 291–297.
- [13] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及 展望 [J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315–3325.
  LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315–3325.
- [14] TAN Y, MUTTAQI K M, CIUFO P, et al. Enhanced frequency regulation using multilevel energy storage in remote area power supply systems[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2018, 34(1): .163–170.
- [15] 李欣然,黄际元,李培强,等.考虑电池储能仿真模型的一次调频特 性评估 [J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2135–2141.
  LI Xinran, HUANG Jiyuan, LI Peiqiang, *et al.* Performance evaluation of primary frequency regulation considering battery energy storage model[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2135–2141.
- [16] 邓睿. 电池储能技术在电力系统调频中的应用研究 [D]. 武汉: 华 中科技大学, 2017.

DENG Rui. Research on frequency regulation for a power system with battery energy storage[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[17] 刘东源.参与电网调频的储能系统运行控制策略研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.

LIU Dongyuan. Study on control stretagy design of battery energy storage system for power grid frequency regulation[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2018.

- [18] 李欣然,邓涛,黄际元,等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控 制策略 [J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2362–2369.
  LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, *et al.* Battery energy storage systems self-adaptation control strategy in fast frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362–2369.
- [19] 吴林林,刘辉,高文忠,等.大容量电池储能参与电网一次调频的优 化控制策略研究 [J]. 华北电力技术, 2017(3): 32–38.
  WU Linlin, LIU Hui, GAO Wenzhong, *et al.* Research on the optimal

26

control strategy of large capacity battery energy storage for primary frequency modulation[J]. North China Electric Power, 2017(3): 32–38.

[20] 何仰赞, 温增银. 电力系统解析 (下册)[M]. 武昌: 华中科技大学出版社, 2006.

#### 作者简介:

张嘉诚(1997—), 男, 硕士研究生, 从事储能在电 力系统中的应用研究, E-mail: 1045992251@qq.com; 夏向阳(1968—),男,通信作者,博士,教授,从 事新能源并网接入和电网储能控制研究,E-mail: 307351045@qq.com;

邓子豪(1995—),男,硕士研究生,从事电力系统 仿真与分析研究, E-mail: 1329219807@qq.com;

陈贵全(1997—), 男, 硕士研究生, 从事新能源发 电及并网研究, E-mail: 1959248924@qq.com。

(责任编辑 蒋东方)

型储能

## Optimal Control Strategy for Energy Storage Power Station in Primary Frequency Regulation of Power Grid

#### ZHANG Jiacheng, XIA Xiangyang, DENG Zihao, CHEN Guiquan

(College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to achieve accurate and fast primary frequency regulation of power grid without compromising the safety of the participating energy storage system, this paper proposes an energy storage assisted frequency modulation adaptive optimization control strategy considering both the State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) in response to the demand of real power generation due to the system frequency deviation. According to the real-time status of the energy storage unit, the optimal switching plan is determined for multiple groups of energy storage units participating in the primary frequency modulation of the power grid. In the early stage of frequency change, depending on their health status, multiple groups of energy storage units should coordinate their output together to reduce frequency deviation. During the frequency recovery stage, the health status and charging state of each storage unit is taking into account individually so as to ensure the performance of energy storage frequency modulation while keeping each energy storage unit in a healthy operating state. In this way both the safety and economy of the energy storage system are improved. Finally, a primary frequency modulation model of the regional power grid was built, and the effectiveness of the strategy was verified by step and continuous disturbance testing.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (Research on Energy Regulation Mechanism and Ride-Through Control of Converter Multi-arm Active Response under AC Side Fault of Flexible HVDC Transmission, No.51977014).

**Keywords**: energy storage power station; primary frequency modulation; adaptive optimal control; state of charge; safety of energy storage system