

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200472

# 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略

李军徽<sup>1</sup>, 高卓<sup>1</sup>, 应鸿<sup>2</sup>, 林琳<sup>2</sup>, 沈宝兴<sup>2</sup>, 范兴凯<sup>3</sup>

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;  
2. 浙江华云清洁能源有限公司, 浙江 杭州 310001; 3. 广东电网公司韶关供电局, 广东 韶关 512026)

**摘要:** 为高效利用储能资源满足电网一次调频需求, 提出一种基于动态下垂系数与动态 SOC 基点(Dynamic Droop Coefficient and Dynamic Reference of SOC, DDC&DRSOC)的储能一次调频控制策略。提出以电网调频死区为分割边界将储能调频过程划分为调频阶段与 SOC 恢复阶段: 在调频阶段, 以 SOC 和最大频率偏差为控制量自适应调整储能出力深度以防止储能 SOC 的饱和或殆尽; 在 SOC 恢复阶段, 首先提出适应负荷变化的动态 SOC 恢复基点调整方法, 然后提出兼顾 SOC 恢复需求与电网承受能力的储能出力确定方法, 最后设计双层模糊控制器实现动态 SOC 基点值和储能出力值的确定。提出 3 个评价指标评估一次调频效果与 SOC 维持效果。以某区域电网为例, 在阶跃负荷扰动和连续负荷扰动下验证了所提策略的有效性。仿真结果表明所提策略 SOC 维持效果较对比策略提高 9%, 调频效果提高 4%。

**关键词:** 储能; SOC; 一次调频; 控制策略; 风力发电

## Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference

LI Junhui<sup>1</sup>, GAO Zhuo<sup>1</sup>, YING Hong<sup>2</sup>, LIN Lin<sup>2</sup>, SHEN Baoxing<sup>2</sup>, FAN Xingkai<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. Zhejiang Huayun Clean Energy Co., Ltd., Hangzhou 310001, China; 3. Shaoguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Shaoguan 512026, China)

**Abstract:** In order to efficiently use Energy Storage System (ESS) to meet the Primary Frequency Regulation (PFR) needs of the power grid, a control strategy for ESS based on dynamic droop coefficient and dynamic SOC reference is proposed. It is proposed to divide the ESS frequency regulation process into frequency regulation stage and SOC recovery stage with the frequency dead zone of power system as the boundary. In the frequency regulation stage, the SOC and the maximum frequency deviation are used as control variables to adaptively adjust the output of ESS to prevent the SOC from exceeding the limit. In the SOC recovery stage, first, the dynamic SOC restoration reference adjustment method that adapts to load changes is proposed. Then, a method for determining the output power of ESS that takes into account the SOC recovery requirement and the power grid affordability is proposed. Finally, a double-layer fuzzy controller is designed to determine the dynamic SOC restoration reference and the power of the ESS. Three evaluation indicators are proposed to evaluate the frequency regulation effect and SOC maintenance effect. Taking a certain regional power grid as an example, the effectiveness of the proposed strategy is verified under step load disturbance and continuous load disturbance. The simulation result shows that the SOC maintenance effect and frequency regulation effect of the proposed strategy is 9% and 4% higher than the comparison strategy, respectively.

This work is supported by the Central Government Guiding the Basic Research Project of the Provincial Key Laboratory of Local Science and Technology Development Funds (No. 202002005JC) and the Science and Technology Project of Huayun Clean Energy Co., Ltd. (No. 2020220202000042).

**Key words:** energy storage; SOC; primary frequency regulation; control strategy; wind power

## 0 引言

近年来, 风电迅速发展, 截至 2019 年底, 我国

风电总装机容量已达到 2.1 亿 kW, 占全部发电装机的 10.4%<sup>[1]</sup>。尤其在“三北地区”的多个省份, 省级电网风电装机占比达到 40%以上。然而, 风机自身与电力系统频率解耦, 高比例风电对传统机组的取代将会导致系统惯性减弱, 一次调频能力降低<sup>[2]</sup>; 另外, 风电的随机性和波动性在大规模并网时更加凸显, 将给电网带来更大的功率扰动<sup>[3-6]</sup>。因此, 在

**基金项目:** 中央引导地方科技发展资金省重点实验室基础研究专项资助(202002005JC); 浙江华云清洁能源有限公司科技项目资助(2020220202000042)

这样的双重压力下，亟需借助新的调频手段弥补传统方式下一次调频能力的不足。

近年来，电化学储能因动作迅速、控制灵活等优势被大量应用于电网辅助调频领域，当前全球兆瓦级电化学储能调频项目总数已达到 160 余项<sup>[7-8]</sup>，但装机容量仅有 2 457 MW。相比较而言，储能容量仅占电网容量极小的一部分，如何利用有限容量的储能安全持续地辅助一次调频，对控制策略的科学性、高效性提出了更高的要求。国内外学者针对储能控制策略这一领域已经开展了一系列研究工作<sup>[9]</sup>。

文献[10]利用储能辅助风电调频，依据风机转子转速，基于实时时间测量的下垂法调整储能功率，文献[11]利用分频系统对扰动进行分频，令储能承担高频扰动分量，提高了频率调整速度；文献[12]提出设置储能调频死区小于传统机组调频死区，从而减少传统机组在死区附近的频繁动作；文献[13-14]提出根据一次调频过程的频率特征，自适应调整虚拟惯性控制和虚拟下垂控制的分配系数，实现两种策略的优势互补与平滑切换。以上研究着重于从电网频率需求的角度对电池储能出力策略进行设计，但是未能充分考虑储能的电量管理。

储能 SOC 的维持是对其电量高效利用的关键<sup>[15]</sup>，也有一些研究考虑到了储能参与调频过程中的 SOC 管理问题。文献[16]利用 Logistic 回归函数的平滑特性，提出储能自适应调频与自恢复工况下的控制策略；文献[17]提出在调频死区时，根据储能上报的基点功率恢复 SOC；文献[18]在死区时恢复 SOC，但是调频阶段与恢复阶段相互独立，未充分考虑系统状态对储能 SOC 恢复的限制，容易造成频率因 SOC 恢复跌出死区。文献[19]提出在频率状态良好时，采用线形分段函数调成储能充放电功率以恢复 SOC，但是线形分段函数平滑性相对较差。综上，现有关于储能控制策略的研究主要存在以下两点问题：①对 SOC 的管理多集中在储能承担调频任务量的调节上，而未能在在此基础上充分利用调频死区对 SOC 维持做贡献；②涉及到 SOC 自恢复的研究多是以 0.5 为基准，缺少一种既能适应 SOC 恢复需求，又能适应负荷变化的 SOC 恢复基准确定方法。

为了在保证调频效果的同时保证储能 SOC 的状态，维持储能长期稳定的出力，本文提出基于 SOC 反馈的自适应一次调频控制策略。在调频时段基于 Logistic 函数根据储能 SOC 状态实时调整其单位调节功率；在储能 SOC 恢复时段，提出利用双层模糊控制自适应调整储能恢复 SOC 的功率，第一层模糊控制根据当前负荷状态动态调节 SOC 恢复基准，第二层模糊控制根据当前频率偏差及储能 SOC

恢复需求调整储能充放电功率。最后，以区域电网为算例，在阶跃扰动、短时连续扰动、长时间连续扰动几种工况下对所提控制策略的有效性进行了仿真验证。

## 1 含储能的区域电网一次调频动态模型

含储能的区域电网的一次调频模型可以等效为如图 1 所示的动态模型。图 1 中： $M$  为系统的等效惯量； $D$  为系统的等效阻尼常数； $\Delta f$  为系统频率偏差； $P_{nl}$  为系统负荷扰动量； $K_{ESS}$  为储能的单位调节功率； $G_{ESS}(s)$  为储能的传递函数； $K$  为传统机组的单位调节功率。

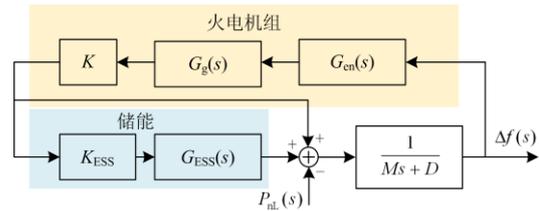


图 1 含储能的区域电网一次调频动态模型

Fig. 1 Primary frequency regulation dynamic model of regional power grid with ESS

由于发电机组的频率动态特性主要受调速器和汽轮机的影响较大，所以在对其建模时，主要考虑调速器和汽轮机的模型<sup>[20]</sup>。

发电机组调速器传递函数为

$$G_g(s) = \frac{1}{1 + sT_g} \quad (1)$$

汽轮机传递函数为

$$G_{en}(s) = \frac{1 + F_{HP}T_{RH} \cdot s}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (2)$$

式中： $T_g$  为调速器时间常数； $T_{CH}$  为主进气容积和气室的时间常数； $T_{RH}$  为再热器时间常数； $F_{HP}$  为再热器增益，即高温高压情况下汽轮机的可发功率与总功率的比值。

对于储能参与电力系统频率调节的模型，可以用一阶惯性环节来等效，文献[21]已经从仿真精度和仿真速度两方面验证了简化储能模型用于电网调频的有效性，因此本文采用该简化模型，其传递函数为

$$G_{ESS}(s) = \frac{1}{1 + sT_{ESS}} \quad (3)$$

式中， $T_{ESS}$  为储能响应时间常数。

## 2 储能一次调频控制方法

考虑到储能 SOC 的维持效果与其调频效果呈相辅相成的关系，本文以电网调频死区 ( $|f| = f_d$ ) 为

界限将储能参与一次调频分为自适应调频阶段 ( $|f| > f_d$ , 以下简称调频阶段) 与自适应 SOC 恢复阶段 ( $|f| \leq f_d$ , 以下简称 SOC 恢复阶段)。在调频阶段根据实时频率偏差与 SOC 进行下垂系数动态调节; 在 SOC 恢复阶段, 首先根据当前负荷扰动大小及其变化趋势自适应决策储能 SOC 恢复基点值, 然后再根据当前频率偏差及 SOC 偏差调整储能出力深度。基于以上思路本文构建的储能一次调频控制策略框架如图 2 所示。

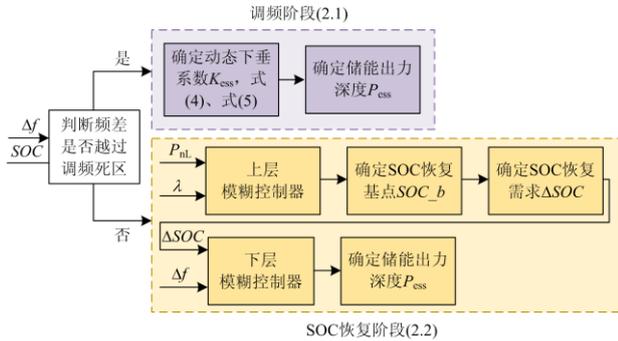


图 2 储能一次调频控制策略框架图

Fig. 2 Framework of primary frequency regulation control strategy of ESS

## 2.1 调频阶段储能出力控制方法

为防止因储能 SOC 饱和或殆尽造成对电网频率的更大冲击, 本文采用根据储能 SOC 实时状态自适应调节虚拟下垂系数  $K_{ESS}$  的方法, 令  $K_{ESS}$  随着 SOC 的变化以“S”曲线形式变化。“S”型变化的  $K_{ESS}$ -SOC 曲线用分段函数表示如式(4)所示。

$$K_{dc} = \begin{cases} 0, & 0 < SOC < SOC_{min} \\ \frac{K_{max} P_0 \cdot e^{\frac{n \cdot (SOC - SOC_{min})}{(SOC_{low} - SOC_{min})}}}{K_{max} + P_0 \cdot (e^{\frac{n \cdot (SOC - SOC_{min})}{(SOC_{low} - SOC_{min})}} - 1)}, & SOC_{low} < SOC < SOC_{high} \\ K_{max}, & SOC_{high} < SOC < SOC_{max} \end{cases} \quad (4)$$

$$K_c = \begin{cases} K_{max}, & 0 < SOC < SOC_{min} \\ \frac{K_{max} P_0 \cdot e^{\frac{n \cdot (SOC_{max} - SOC)}{(SOC_{max} - SOC_{high})}}}{K_{max} + P_0 \cdot (e^{\frac{n \cdot (SOC_{max} - SOC)}{(SOC_{max} - SOC_{high})}} - 1)}, & SOC_{low} < SOC < SOC_{high} \\ 0, & SOC_{high} < SOC < SOC_{max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $K_{dc}$ 、 $K_c$  分别代表储能的虚拟单位放电功率、虚拟单位充电功率;  $SOC$  代表储能荷电状态实测值;  $K_{max}$  表示最大虚拟单位调节功率;  $SOC_{min}$ 、

$SOC_{low}$ 、 $SOC_{high}$ 、 $SOC_{max}$  分别对应储能 SOC 的最小值、偏小值、偏大值、最大值;  $P_0$ 、 $n$  为曲线的自适应因子, 决定曲线的形状。 $P_0$ 、 $n$  的确定过程如附录图 A1 所示。

## 2.2 SOC 恢复阶段储能出力控制方法

频率处于死区内时, 储能无调频任务, 为了有效地维持储能的 SOC, 可以充分利用该时机对储能进行 SOC 恢复。本文首先依据负荷变化趋势确定 SOC 的恢复基点, 然后根据当前频率偏差及 SOC 恢复需求确定储能的动作深度, 最终通过双层模糊控制器实现所提方案。

### 2.2.1 储能 SOC 基点动态调整规则

如图 3 所示, 若已知当前时刻的负荷扰动及负荷变化率的大小和方向, 则可以初步预知下一时刻的负荷大小为

$$P_{nl}(t+1) = P_{nl}(t) + \lambda(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

式中:  $P_{nl}(t)$  为  $t$  时刻的负荷扰动;  $\lambda(t)$  为  $t$  时刻的负荷变化率;  $\Delta t$  为采样时间间隔。

据此, 可以避免复杂的负荷预测, 得到短时间内负荷发展趋势, 并为储能 SOC 的恢复方向及大小提供参考。本文定义 SOC 基点为 SOC 恢复的基准值, 用于确定 SOC 恢复方向。

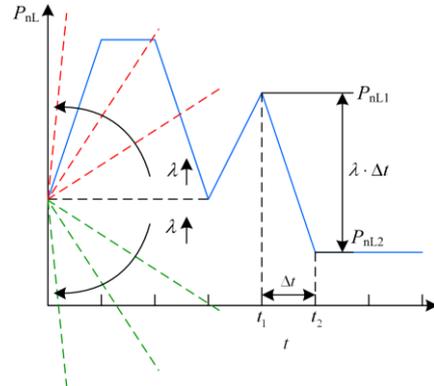


图 3 负荷变化趋势示意图

Fig. 3 Schematic diagram of load change trend

风电的接入会导致净负荷波动增加, 而储能的 SOC 状态在短时间内不会有太大变化, 因此为了避免因风电的频繁波动导致 SOC 基点的频繁变化,  $\Delta t$  不宜过小。综合考虑一次调频的时间尺度和储能调频的容量配置时间尺度, 本文选取  $\Delta t = 400$  s。

根据  $P_{nl}(t+1)$  设置 SOC 恢复基点  $SOC_b$  的示意图, 如图 4 所示。

按照图 4 所示, 在调频死区内, 首先根据当前负荷扰动  $P_{nl}(t)$  的大小及其爬坡率  $\lambda(t)$ , 对下一时刻

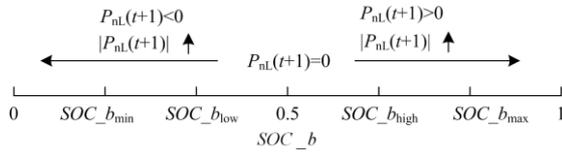


图4 SOC恢复基准调整方法示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the adjustment method for SOC restoration reference

负荷  $P_{nl}(t+1)$  的变化趋势进行初步预判, 再根据对  $P_{nl}(t+1)$  预判的结果, 自适应调整 SOC 的恢复基点  $SOC_b$ 。以正向负荷扰动 ( $P_{nl}(t) > 0$ ) 为例, 阐述具体思想:

1) 若当前时刻  $P_{nl}(t) > 0$ , 且  $|P_{nl}(t)|$  较大, 同时, 负荷变化率  $\lambda(t) > 0$ , 则预判下一时刻负荷  $P_{nl}(t+1)$  较大, 需要储能以较大功率放电, 需设置一个较大的恢复基点  $SOC_{b_{max}}$ 。

2) 若当前时刻  $P_{nl}(t) > 0$ , 且  $|P_{nl}(t)|$  较小; 同时, 负荷变化率  $\lambda(t) > 0$ , 且  $\lambda(t)$  较小, 则预判下一时刻  $P_{nl}(t+1)$  较小, 需要储能以较小功率放电, 则需设置一个较小的恢复基点  $SOC_{b_{high}}$ ; 而若  $\lambda$  较大, 则预判下一刻负荷  $P_{nl}(t+1)$  较大, 需设置一个大的恢复基点  $SOC_{b_{max}}$ 。

3) 若  $P_{nl}(t) < 0$  且  $\lambda(t) > 0$ , 说明负荷扰动处于减缓状态, 则预判下一刻负荷  $P_{nl}(t+1)$  较小, 需要储能以较小功率放电, 需设置一个比较小的恢复基点  $SOC_{b_{high}}$ 。

4) 若  $P_{nl}(t) = 0$  且  $\lambda(t) > 0$ , 则预判下一刻需要储能以较小功率放电, 需设置一个比较小的恢复基点  $SOC_{b_{high}}$ 。

负荷扰动为负即  $P_{nl}(t) < 0$  时, 控制规律与正向负荷扰动相反, 此处不再赘述。为使得控制规则展示更加清晰, 下面用负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)表示负向偏大、负向偏小、零, 正向偏小、正向偏大描述  $P_{nl}$ 、 $\lambda$ 、 $SOC_b$  的取值区间, 形成如表 1 所示控制规则语言表。

表 1 SOC 基点控制规则语言表

Table 1 Language table of the control rules for SOC restoration

$\lambda$	$P_{nl}$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	ZO	ZO
NS	NB	NS	ZO	ZO	ZO
ZO	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	ZO	ZO	ZO	PS	PB
PB	ZO	ZO	PS	PB	PB

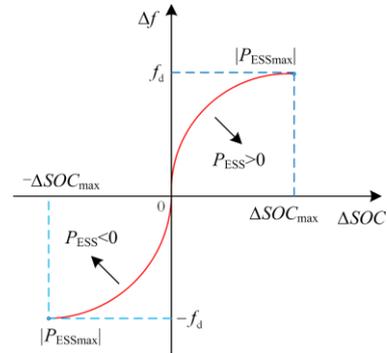
## 2.2.2 储能 SOC 恢复出力深度控制规则

首先, 定义 SOC 恢复需求为恢复基点与当前 SOC 的差值, 即

$$\Delta SOC = SOC_b - SOC \quad (7)$$

式中:  $\Delta SOC$  为恢复需求;  $SOC_b$  为 SOC 恢复基点。当  $\Delta SOC < 0$  时, 需要储能放电,  $P_{ESS} > 0$ ; 当  $\Delta SOC > 0$  时, 需要储能充电,  $P_{ESS} < 0$ 。

然后, 在频率死区内, 根据 SOC 恢复需求  $\Delta SOC$  与当前频率偏差  $\Delta f$ , 自适应调整储能用于 SOC 恢复的功率  $P_{ESS}$ , 示意图如图 5 所示。需要说明的是, 图中曲线仅代表  $\Delta f$ 、 $\Delta SOC$  与  $P_{ESS}$  具有非线性关系, 不代表具体函数关系。

图5 储能 SOC 恢复功率 P<sub>ESS</sub> 调整示意图Fig. 5 Schematic of  $P_{ESS}$  adjustment for SOC restoration

根据图 5, 阐述具体控制原理如下:

1) 若  $\Delta f > 0$  且  $\Delta SOC > 0$ , 说明储能 SOC 恢复对电网频率恢复起积极作用, 则令储能以较大功率充电;

2) 若  $\Delta f < 0$  且  $\Delta SOC < 0$ , 则储能 SOC 恢复对电网频率恢复起积极作用, 则令储能以较大功率放电;

3) 若  $\Delta f > 0$  但  $\Delta SOC < 0$ , 则储能 SOC 恢复对电网频率恢复起消极作用, 为保证频率不跌出死区, 令储能以 0 附近某一值充电。

4) 若  $\Delta f < 0$  但  $\Delta SOC > 0$ , 则储能 SOC 恢复对电网频率恢复起消极作用, 为保证频率不跌出死区, 令储能以 0 附近某一值放电。

根据以上分析, 用负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB)表示  $\Delta f$ 、 $\Delta SOC$ 、 $P_{ESS}$  的取值区间, 制定储能 SOC 恢复出力控制规则语言表如表 2 所示。

## 2.2.3 双层模糊控制器的设计

模糊控制是一种基于规则的控制, 直接采用语言型控制规则, 相较于经典控制理论和现代控制理论, 它无需依赖于精确的数学模型, 且具有良好的非线性控制效果, 在电力系统中应用广泛<sup>[22-24]</sup>。

表 2 恢复阶段储能功率控制规则语言表

Table 2 Language table of the control rules for the output of ESS at recovery stage

$\Delta SOC$	$\Delta f$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	ZO	ZO	ZO
NS	PB	PB	ZO	ZO	ZO
ZO	PS	PS	ZO	NS	NS
PS	ZO	ZO	ZO	NB	NB
PB	ZO	ZO	ZO	NB	NB

本文所提控制思想具有较强的非线性和模糊性, 因此可借助模糊控制器实现。本文设计双层模糊控制器用于整定恢复阶段储能输出功率, 上层模糊控制器用于整定 SOC 的恢复基点, 进而确定当前 SOC 的恢复需求  $\Delta SOC$ ; 下层模糊控制器用于根据  $\Delta f$  及  $\Delta SOC$  确定储能用于 SOC 恢复的功率  $P_{ESS}$ 。

根据 2.2.1 和 2.2.2 节所提方法设计模糊控制器。

#### 1) 上层模糊控制器的设计

选用二维模糊控制器, 负荷扰动值  $P_{nL}$  及负荷变化率  $\lambda$  作为模糊控制器的输入控制量, 控制器的输出量为  $SOC_b$ 。输入输出量的语言模糊集均设置为 {NB(负大), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PB(正大)}。负荷扰动值  $P_{nL}$  及负荷变化率  $\lambda$  归一化后的论域为  $[-1, 1]$ ,  $SOC_b$  取离散论域  $[0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9]$ 。输入量  $P_{nL}$ 、 $\lambda$  的隶属度函数为三角函数, 输出量的隶属度函数为离散论域。输入输出量的隶属度函数示意图分别由附录图 A2(a)、A2(b)、A2(c) 所示。

实际系统运行中, 实际的  $P_{nL}$ 、 $\lambda$  有可能不在上述论域范围内, 而在论域  $[-P_{nL|m}, P_{nL|m}]$  和  $[-\lambda|m, \lambda|m]$  上, 则需通过量化因子进行调整使实际输入到论域  $[-1, 1]$  内,  $P_{nL}$ 、 $\lambda$  的量化因子  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  的计算方式为

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{P_{nL|m}} \\ \alpha_2 = \frac{1}{\lambda|m} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_{nL|m}$  与  $\lambda|m$  分别为  $P_{nL}$ 、 $\lambda$  的论域边界值。

根据上文所述的控制思想, 共建立 25 条模糊控制规则, 同表 1 所示。

#### 2) 下层模糊控制器的设计

第二层二维模糊控制器选用  $\Delta SOC$ 、 $\Delta f$  作为其输入控制量, 储能输出功率  $P_{ESS}$  作为输出控制量, 输入输出量的语言模糊集均设置为 {NB(负大), NS(负小), ZO(零), PS(正小), PB(正大)}。 $\Delta SOC$  的论域设置为  $[-0.8, 0.8]$ , 由于恢复阶段设置在调频

死区范围内, 所以  $\Delta f$  的论域设置为  $[-0.033/50, 0.033/50]$ , 考虑到储能的充放电效率, 将  $P_{ESS}$  的论域设置为  $[-0.96, 0.96]$ 。为在 SOC 恢复需求较大时储能具有较大的出力, 输入量  $\Delta SOC$  的隶属度函数由三角分布函数与梯形分布函数构成, 如附录图 A3(a) 所示; 又考虑到在死区范围内, 储能在某个频率偏差区间里以较大功率恢复 SOC, 因此输入量  $\Delta f$  的隶属度函数同样由三角分布函数与梯形分布函数共同构成, 如附录图 A3(b) 所示。输出量  $P_{ESS}$  采用三角隶属度函数, 如附录图 A3(c) 所示。第二层模糊控制器的控制规则同表 2。

在获得模糊输出量后, 需要进行解模糊运算, 本文采用最大隶属度法进行解模糊计算。根据本文所设计的模糊控制规则, 两层模糊控制器的输入输出规律分别如图 6、图 7 所示。

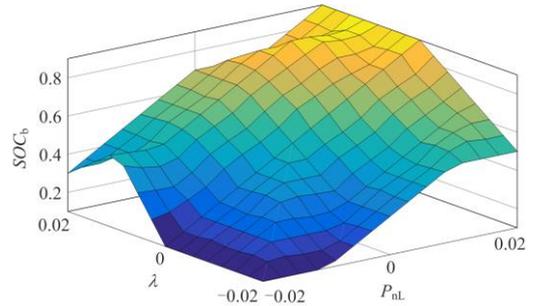


图 6 上层模糊控制器控制规律

Fig. 6 Laws of the upper fuzzy control

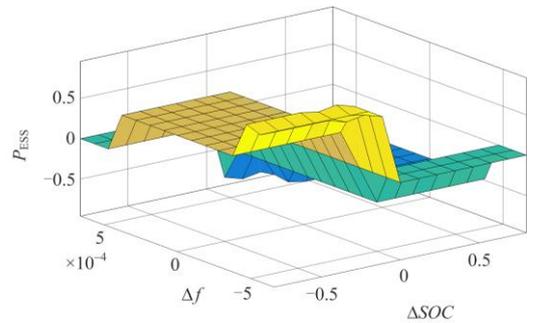


图 7 下层模糊控制器控制规律

Fig. 7 Laws of the lower fuzzy control

综合以上分析, 本文提出用于一次调频的储能动态下垂系数与动态 SOC 基准值法, 储能控制部分如图 8 所示。控制模型主要包括调频模块与 SOC 恢复模块, 模块具体构成及控制规则如 2.1 和 2.2 节所述。

### 3 储能调频评价指标

为了定量评估所提策略的调频效果及 SOC 恢复效果, 提出以下评价指标。

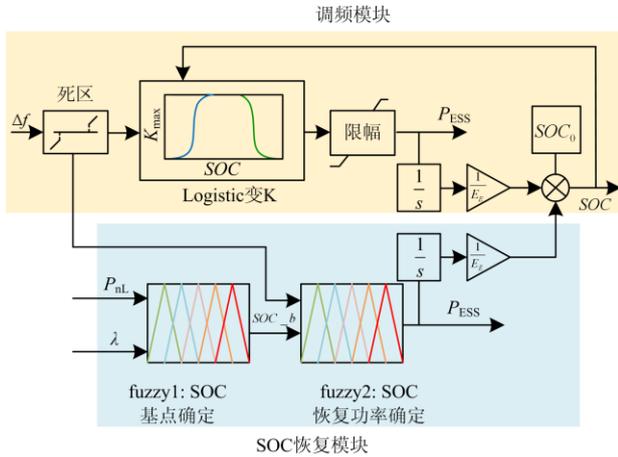


图 8 动态下垂系数与动态 SOC 基准值法控制模型

Fig. 8 Primary frequency regulation control model of ESS based on dynamic reference value

1) 最大频率偏差  $\Delta f_m$ ：针对阶跃负荷扰动，对应扰动后出现的最大频率偏差， $\Delta f_m$  越小，代表调频效果越好。

2) 频率偏移度：针对连续负荷扰动，反映系统频率偏离标准频率的程度。

$$f_o = \sqrt{\frac{1}{n_{um}} \sum_{i=1}^{n_{um}} (f_i - f_N)^2} \quad (9)$$

3) SOC 偏移度：反应 SOC 偏离标准 SOC 的程度。

$$SOC_o = \sqrt{\frac{1}{n_{um}} \sum_{i=1}^{n_{um}} (SOC_i - SOC_N)^2} \quad (10)$$

式中： $f_i$ 、 $SOC_i$  分别为采样点  $i$  所对应的频率和荷电状态； $f_N$  为标准频率 50 Hz； $SOC_N$  为标准 SOC，取 0.5； $n_{um}$  为总的采样点数。频率偏移度和 SOC 偏移度越小，代表频率或 SOC 的偏离程度越好，也就表示调频效果或 SOC 维持效果越好。

## 4 算例分析

### 4.1 算例条件

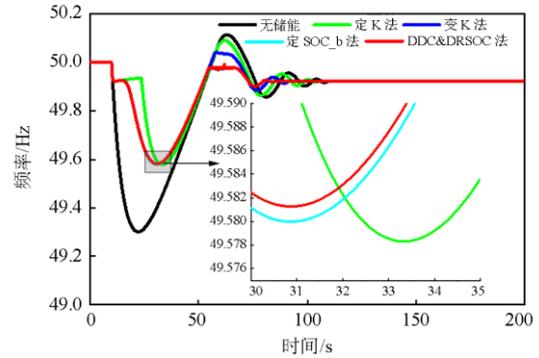
本文对某区域电网进行研究，该电网机组容量为 260 MW，最大负荷为 200 MW，新能源占比为 40%，配置储能容量为 1 MW/0.5MWh。参数以机组容量 1 000 MW 为基准进行标幺化。假设所有机组满发，仿真系统详细参数如附录表 A1 所示。

### 4.2 典型工况分析

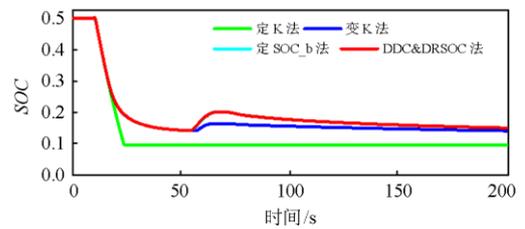
在 3 种典型工况下，对无储能、定 K 法、变 K 法(无 SOC 恢复)、定 SOC\_b 法及 DDC&DRSOC 法几种不同控制策略下的调频效果进行仿真分析。

#### 4.2.1 工况 1：阶跃负荷扰动

在 10 min 时刻加入 0.02 p.u.阶跃负荷扰动，几种策略下的频率响应和 SOC 变化曲线如图 9 所示，相关调频指标如表 3 所示。



(a) 频率响应曲线



(b) SOC 变化曲线

图 9 工况 1：频率响应曲线及 SOC 变化曲线

Fig. 9 Case 1: response curve of frequency and SOC

表 3 工况 1：调频指标统计

Table 3 Case 1: indicator statistics of frequency regulation

指标	调频方法				
	无储能	定 K 法	变 K 法	定 SOC_b 法	DDC&DRSOC 法
$\Delta f_m$	0.699	0.422	0.421	0.421	0.419

由图 9(a)可以看出，在阶跃扰动接入的初期，5 种调频方式所对应的频率均迅速下降，而无储能情况下频率偏差明显高于有储能的几种控制方式，可见引入储能能够有效改善频率响应效果。定 K 法在 25 s 时，储能达到能量下限而无法继续调频，其突然的退出导致频率以较大的速率跌落。而变 K 法、定 SOC\_b 法及 DDC&DRSOC 法因对储能出力平滑限制，储能退出相对平滑，频率下降速度较定 K 法缓慢。且据表 3，本文方法的最大频率偏差也要略小于其他几种有储能方法。

由图 9(b)可以看出，定 K 法情况下，因储能一直以最大出力放电，SOC 迅速降低至下限 0.1，因无 SOC 恢复控制，此后 SOC 保持不变。变 K 法因对储能出力的平滑调节，SOC 变化相对定 K 法平滑很多；定 SOC\_b 法与 DDC&DRSOC 法在 SOC 变

化相对平滑的基础上, 因为 SOC 恢复控制的加入, 在调频死区时, 能够在不使频率恶化的条件下, 进行 SOC 自恢复, SOC 维持效果比定 K 法和变 K 法更好。需要说明的是, 变 K 法在 51 s 时发生了一个 SOC 恢复过程, 但是此处的 SOC 恢复不同于定 SOC\_b 法和本文方法, 而是由于频率短暂超过 50 Hz, 储能进行充电调节所致。

#### 4.2.2 工况 2: 5 min 短时负荷扰动

为验证 DDC&DRSOC 法在连续负荷扰动下的优越性, 在系统中加入 5 min 连续负荷扰动, 负荷扰动曲线如图 10 所示。可以看出, 该时段的频率扰动主要为负向扰动, 意味着储能很大概率上要进行充电调频, 按照本文策略, 在此时段储能的 SOC 恢复基点要低于 0.5。

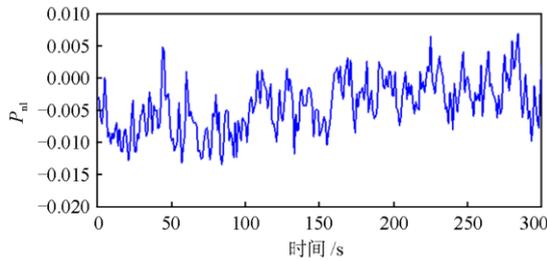


图 10 5 min 负荷扰动曲线

Fig. 10 5 min load disturbance curve

5 种调频方式下的频率变化及储能 SOC 变化曲线如图 11。相应评价指标如表 4 所示。

由图 11(a)可以看出, 在短时扰动工况下, 一开始, 无储能方式频率偏移最严重, 有储能的几种调频策略优于无储能方式。定 K 法在初期调频效果最好, 但因储能电量很快被耗尽, 不再为调频做贡献, 后续的调频效果与无储能方式无明显差异; 变 K 法因对 SOC 的有效维持, 调频持续时间相较于定 K 法更久, 因此调频效果相较于定 K 法也要更优越。

虽然由表 4 可以看出 DDC&DRSOC 法频率偏移度略大于定 SOC\_b 法, 但由图 11(a)及其局部放大图 11(b)可以看出, 本文频率偏差大于定 SOC\_b 法频率偏差的情况均发生在调频死区内, 这是由于 DDC&DRSOC 法在死区内比定 SOC\_b 法为 SOC 恢复做出了更大贡献而造成的, 而这种在死区内产生的频率偏差对调频的影响是可以忽略的。

另外, 由图 11(c)可以看出, 本文 SOC 始终最接近标准频率 0.5, 且据表 4 数据可以得到, DDC&DRSOC 法 SOC 偏移度比变 K 法小 15%, 比定 SOC\_b 法小 6%, SOC 维持效果最佳。

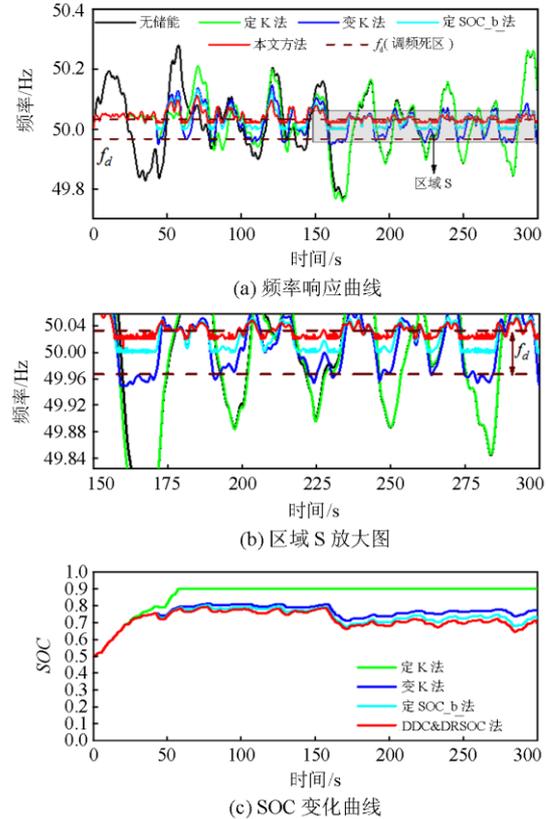


图 11 工况 2: 频率响应曲线及 SOC 变化曲线

Fig. 11 Case 2: response curve of frequency and SOC

表 4 工况 2: 调频指标统计

Table 4 Case 2: indicator statistics of frequency regulation

指标	调频方法				
	无储能	定 K 法	变 K 法	定 SOC_b 法	DDC&DRSOC 法
$f_0$	0.115	0.103	0.039	0.028	0.022
SOC <sub>0</sub>	—	0.382	0.270	0.245	0.229

#### 4.2.3 工况 3: 1 h 长时间负荷扰动

为进一步证明本文策略的有效性, 在区域电网模型中加入 1 h 的连续负荷扰动, 如图 12 所示。定 SOC\_b 法及 DDC&DRSOC 法下 SOC 基准变化曲线如图 13 所示, 5 种控制策略所对应的频率变化曲线及 SOC 变化曲线分别如图 13(b)和图 13(c)所示。

由图 13(a)可以看出, 在本文调频方式下, 储能 SOC 恢复基点随负荷趋势相应变化, 在 T1 时段, 负荷由正向发展为负向, 这个过程中储能由放电转为充电, 相应的, SOC 恢复基点由大变小。T2 时段, 负荷扰动主要为负向扰动且有减弱趋势, SOC 恢复基点一直处于 0.5 以下, 且逐渐增大。说明本文策略 SOC 恢复基点可以适应负荷发展趋势。

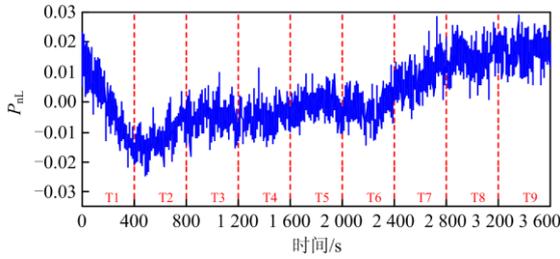
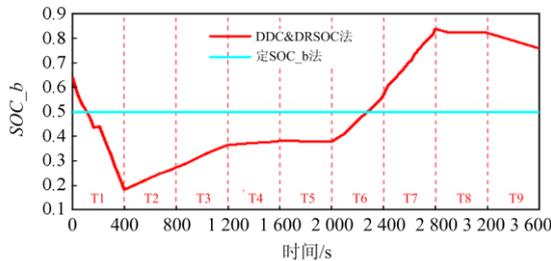
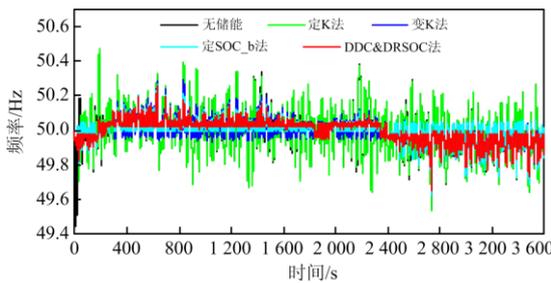


图 12 1 h 负荷扰动曲线

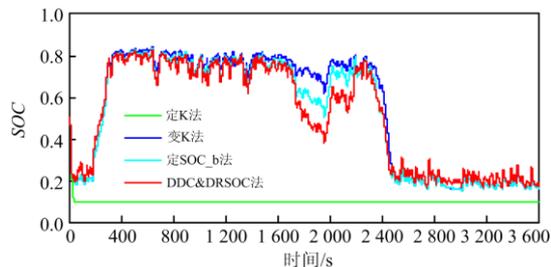
Fig. 12 1 h load disturbance curve



(a) 不同调频方式下的 SOC\_b 对比



(b) 频率变化曲线



(c) SOC 变化曲线

图 13 工况 3: 频率响应曲线及 SOC 变化曲线

Fig. 13 Case 3: response curve of frequency and SOC

由图 13(c)可以看出,定 K 法因 SOC 很快达到下限退出调频,长期来看,频率调节效果与 SOC 维持效果弱于其他有储能方式。DDC&DRSOC 法与定 SOC\_b 方法可以长期保证调频效果及 SOC 效果,且从表 5 统计结果来看,DDC&DRSOC 法较定 SOC\_b 法频率偏移度小 4%,SOC 偏移度较定 SOC\_b 法小 9%,调频效果与 SOC 维持优势更加明显。

综上,DDC&DRSOC 法比其他几种调节方式更有利于频率的长期稳定与 SOC 的维持,可以提高储能的运行经济性。

表 5 工况 3: 调频指标统计

Table 5 Case 3: indicator statistics of frequency regulation

指标	调频方法				
	无储能	定 K 法	变 K 法	定 SOC_b 法	DDC&DRSOC 法
$f_0$	0.127	0.126	0.056	0.048	0.046
$SOC_0$	—	0.402	0.283	0.266	0.243

## 5 结论

本文提出一种基于 SOC 反馈的储能一次调频控制策略,并得出以下结论:

1) 本文提出的自适应控制策略综合考虑最大频率偏差、储能 SOC、负荷变化趋势,自适应调整储能动作时机及深度,在保证储能调频效果的同时兼顾储能电量的维持效果。阶跃扰动下的仿真结果表明,DDC&DRSOC 法调频效果与其他有储能调频方式相差不大,但 SOC 维持效果优于变 K 法。

2) 通过变下垂系数以及利用调频死区进行 SOC 恢复的综合策略,可以维持 SOC 长时间处于良好状态,使得储能能够保持以较大的出力进行调频,保证频率的长期平滑稳定。

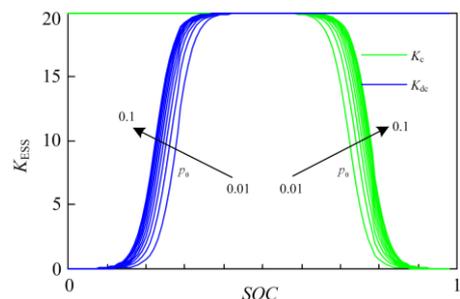
3) 综合考量死区内频率偏移大小和方向,以及负荷的发展方向,在保证频率不恶化的情况下,尽量增加 SOC 恢复功率,使得 SOC 恢复对负荷趋势有较高的适应性,保障 SOC 长期处于良好状态。

## 附录 A

表 A1 仿真参数

Table A1 Simulation parameters

仿真参数	仿真取值	仿真参数	仿真取值
$T_g/s$	0.08	$K$	20
$T_{RH}/s$	10	$K_{max}$	20
$M/p.u.$	6	$P_0$	0.01
$T_{CH}/s$	0.3	$n$	15
$F_{HP}/p.u.$	0.5	$SOC_{max}$	0.9
$D$	5	$SOC_{min}$	0.1
$T_{ESS}$	0.01	$SOC_{high}$	0.45
$f_a/p.u.$	0.000 66	$SOC_{low}$	0.55



(a)  $K_{ESS}$ -SOC 曲线随  $P_0$  的变化趋势

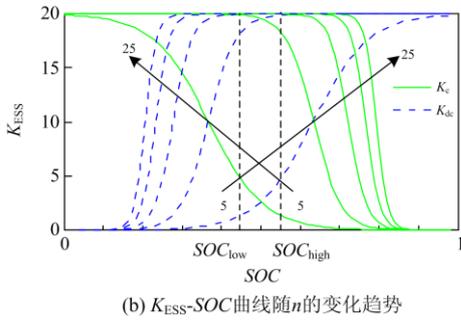


图 A1 基于 logistic 函数的  $K_{ESS}$ -SOC 曲线

Fig. A1  $K_{ESS}$ -SOC curve based on logistic function

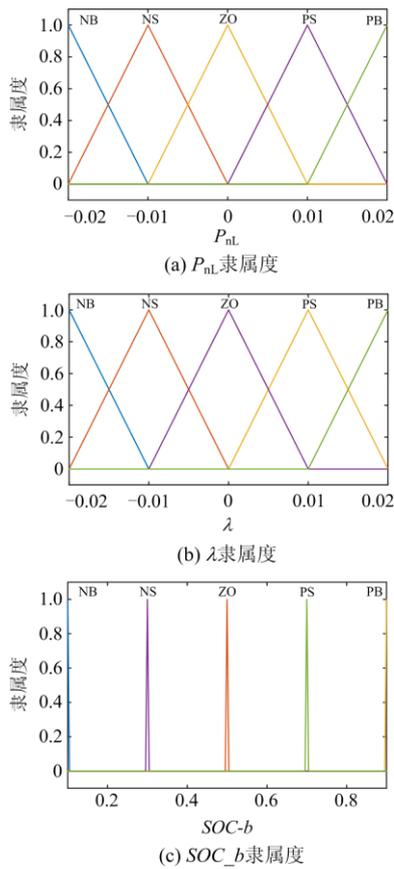
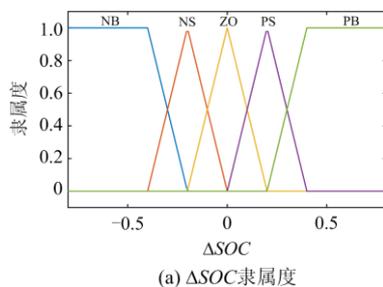


图 A2 上层模糊控制器输入、输出变量隶属度  
Fig. A2 Membership of input variables and output variables of upper fuzzy controller



(a)  $\Delta SOC$  隶属度

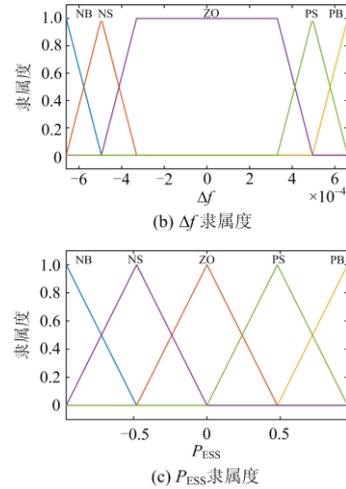


图 A3 下层模糊控制器输入、输出变量隶属度函数  
Fig. A3 Membership of input variables and output variables of lower fuzzy controller

参考文献

- [1] 国家能源局. 2019 年风电并网运行情况[Z]. 2019. National Energy Administration. Wind Power Grid Operation in 2019[Z]. 2019.
- [2] 张虹, 孙权, 李占军, 等. 风氢耦合系统协同控制发电策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(3): 15-23. ZHANG Hong, SUN Quan, LI Zhanjun, et al. Research on cooperative control power generation strategy of wind-hydrogen coupling system[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(3): 15-23.
- [3] LIAN B, SIMS A, YU D, et al. Optimizing LiFePO4 battery energy storage systems for frequency response in the UK system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 385-394.
- [4] LI J, MA Y, MU G, et al. Optimal configuration of energy storage system coordinating wind turbine to participate power system primary frequency regulation[J]. Energies, 2018, 11(6): 1396.
- [5] LIU J, YAO W, WEN J, et al. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of grid-connected DFIG wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 545-557.
- [6] 沈冠治, 李琛, 徐冰亮, 等. 考虑风电并网系统的储能优化配置[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(4): 27-34. SHEN Guanzhi, LI Shen, XU Bingliang, et al. Optimal allocation of energy storage considering wind power integrated to systems[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(4): 27-34.
- [7] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38. SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis on present application of megawatt-scale energy storage in frequency regulation and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [8] LI J, WANG S, LIU Y, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection

- and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [9] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.  
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [10] 赵晶晶, 李敏, 何欣芹, 等. 基于限转矩控制的风储联合调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4982-4990.  
ZHAO Jingjing, LI Min, HE Xinqin, et al. Coordinated control strategy of wind power and energy storage in frequency regulation based on torque limit control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4982-4990.
- [11] 曲彤, 苏小林, 阎晓霞, 等. 基于分频原理和区域控制的风储火联合调频策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(20): 122-129, 147.  
QU Tong, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Frequency combination modulation strategy of wind power, energy storage and thermal power unit system based on frequency division and regional control principle[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(20): 122-129, 147.
- [12] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.  
MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [13] 李欣然, 崔曦文, 黄际元, 等. 电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3897-3908.  
LI Xinran, CUI Xiwen, HUANG Jiyuan, et al. The self-adaption control strategy of energy storage batteries participating in the primary frequency regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18): 3897-3908.
- [14] 邓霞, 孙威, 肖海伟. 储能电池参与一次调频的综合控制方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1157-1165.  
DENG Xia, SUN Wei, XIAO Haiwei. Integrated control strategy of battery energy storage system in primary frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1157-1165.
- [15] YAN G, LIU D, LI J, et al. A cost accounting method of the li-ion battery energy storage system for frequency regulation considering the effect of life degradation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 43-51. DOI: 10.1186/s41601-018-0076-2.
- [16] 李若, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 74-82.  
LI Ruo, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control strategy considering energy storage battery participating in secondary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 74-82.
- [17] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5080-5087.  
HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5080-5087.
- [18] ZHANG Y J, ZHAO C, TANG W, et al. Profit-maximizing planning and control of battery energy storage systems for primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 712-723.
- [19] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-10.  
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-10.
- [20] 严干贵, 张礼钰, 赵伟哲, 等. 基于虚拟同步发电机的光-储调频控制策略研究[J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(3): 1-6.  
YAN Gangui, ZHANG Liyu, ZHAO Weizhe, et al. Strategic studies on frequency-modulated controlling of photovoltaic-energy storage system based on virtual synchronous generator[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(3): 1-6.
- [21] 黄际元. 面向电网调频应用的电池储能电源仿真模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 30(12): 454-464.  
HUANG Jiyuan. Battery energy storage power supply simulation model for power grid frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 30(12): 454-464.
- [22] 李亚男, 王倩, 宋文峰, 等. 混合储能系统平滑风电出力的变分模态分解-模糊控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 58-65.  
LI Yanan, WANG Qian, SONG Wenfeng, et al. Variational mode decomposition and fuzzy control strategy of hybrid energy storage for smoothing wind power outputs[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 58-65.
- [23] DATTA M, SENJYU T. Fuzzy control of distributed PV inverters/energy storage systems/electric vehicles for frequency regulation in a large power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 479-488.
- [24] ZHANG S, MISHRA Y, SHAHIDEHPOUR M. Fuzzy-logic based frequency controller for wind farms augmented with energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1595-1603.

收稿日期: 2020-04-28; 修回日期: 2020-05-09

作者简介:

李军徽(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事新能源发电联网运行关键技术和储能技术应用等方面的研究工作;

E-mail: lijunhui@neepu.edu.cn

高 卓(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为储能技术在新能源发电中的应用。E-mail: 1085504470@qq.com

(编辑 姜新丽)