DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.210 **中图分类号**：TM761 **文献标志码**：A

考虑SOC和δ影响的风储协同一次调频控制研究

柴秀慧[1]，车任达[2]，王晓寰[2](中国电源学会高级会员)，
张纯江[2](中国电源学会高级会员)
(1.天津中德应用技术大学智能制造学院，天津 300350；2.电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学)，秦皇岛 066004)

摘要：为解决高渗透率区域电网存在转动惯量降低、系统调频能力下降、频率稳定性降低等问题，在储能调频的基础上，增加风电机组调频控制，通过分析风电渗透率δ对系统的影响，从减小电池损耗、延长储能寿命的角度出发，提出1种考虑荷电状态SOC(state-of-charge)和δ影响的自适应风储协同一次调频控制PFRC(primary frequency regulation control)策略。该控制策略由考虑SOC和调频死区的储能自适应PFRC和考虑δ的风电自适应PFRC策略协同配合，能够有效提高系统稳定性和电网调频效果。在阶跃扰动下频率的跌落最低点由0.33变为0.07，连续负荷扰动下所提控制策略与单一储能调频相比，频率质量由3.966变为1.676，SOC质量由0.064 07变为0.016 48，储能SOC变化更加平缓，能够节省储能容量的配置，减小储能单元的损耗，相对于单一储能调频能够达到更好的调频效果，维持系统稳定运行。最后通过在MATLAB/Simulink中搭建区域电网模型，验证控制策略的有效性。

关键词：储能；风电；一次调频；自适应协同控制；下垂特性；荷电状态

Research on Wind-storage Coordinated Primary Frequency Regulation Control Considering Influences of SOC and δ

CHAI Xiuhui[1], CHE Renda[2], WANG Xiaohuan[2], *Senior Member*, *CPSS*,
ZHANG Chunjiang[2], *Senior Member*, *CPSS*
(1. Intelligent Manufacturing College, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China;
2. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the problems in a high-permeability regional power grid such as reduced moment of inertia, decreased system frequency regulation capability and lower frequency stability, the frequency regulation control of wind turbines is added on the basis of energy storage frequency regulation. Through the analysis of the influence of wind power permeability (δ) on the system, an adaptive wind-storage coordinated primary frequency regulation control (PFRC) strategy considering the influences of state-of-charge (SOC) and δ is proposed from the perspective of reducing the battery loss and prolonging the energy storage life. This control strategy is realized through the coordination of energy storage adaptive PFRC considering SOC and frequency regulation dead-zone and the wind power adaptive PFRC strategy considering δ, which can effectively improve the system stability and the frequency regulation effect of the power grid. Under the step disturbance, the lowest point of frequency drop changes from 0.33 to 0.07. Under the continuous load disturbance, compared with the single energy storage frequency regulation, the frequency quality under the proposed control strategy is changed from 3.966 to 1.676, and the SOC quality is changed from 0.064 07 to 0.016 48. The data is smaller, and the change in the SOC of energy storage is gentler, which can save the configuration of energy storage capacity and reduce the loss of the energy storage unit. Therefore, a better frequency regulation effect is achieved to maintain the stable operation of the system. Finally, the effect-

收稿日期：2024-08-08；**修回日期**：2024-10-12；**录用日期**：2024-12-07；**网络首发日期**：2024-12-27

tiveness of the control strategy is verified by building a regional power grid model in MATLAB/Simulink.

Keywords: Energy storage; wind power; primary frequency regulation; adaptive coordinated control; droop characteristics; state-of-charge (SOC)

随着风电装机容量不断提高，可再生能源渗透率不断提高，导致含高渗透率可再生能源的区域电网(以下简称为高渗透率区域电网)中存在系统转动惯量低、弃风弃光现象严重、调频能力下降和可再生能源输电波动等问题[1]，导致系统的稳定性降低、并网电能质量降低和频率严重波动。因此，目前亟需新的调频控制策略提高系统频率的调节能力和改善系统的稳定性。

由于储能具有动作迅速、控制精准、灵活等特点，以电网安全运行为前提，将储能单元应用在调频控制是当今研究的热点[2-4],目前许多学者对于储能调频控制策略已经开展了研究。文献[5-6]提出恒定下垂控制系数的 PFRC(primary frequency regulation control)，该方法未考虑 SOC(state-of-charge)对调频的影响，仅在 SOC 跌出极限范围时停止出力，其余范围内皆以最大出力参与调频，非常容易造成调频前期储能容量耗尽而后期无法参与调频的问题；文献[7-11]提出虚拟惯性和虚拟下垂控制结合的 PFRC，通过自适应调整分配系数实现两者的协同控制，在一定程度上达到了理想的调频效果，但是该控制方法未考虑 SOC 对调频的影响，而且平滑性较差；为此有学者提出考虑储能 SOC 的调频控制策略，文献[12-13]提出基于模糊控制的储能调频控制策略，对于电网频率的调节达到了比较好的效果，但控制算法复杂，对于运行状况复杂的区域难以快速响应；文献[14-15]提出基于模型预测控制的风储协调控制策略，在一定程度上改善了效果，但是该控制算法复杂。

近年来，风力发电机组与储能系统 ESS(energy storage system)协同运行，已经成为新能源领域的一个发展态势。这种结合可以通过精确的控制策略，有效减缓风电出力的波动性[16]，同时还能显著增强风电机组在电压降低情况下的运行能力[17]。文献[18]将风速区间进行划分，在不同风速工况下提出相应风电调频控制方法，同时计及不同工况下风电调频与 SOC 储能的协调控制，提出 1 种风储联合参与系统一次调频的控制策略。该策略能够提升系统的暂态频率稳定性，有效利用了风电调频资源，增加了储能参与风电调频的经济性。但是该方法未考虑风电场的功率预测误差、风电场的运行状态(发电量、风资源情况等)对调频控制策略的影响。文献[19]提出 1 种考虑风储协调运行的频率控制策略，能提高双馈风力发电机的调频能力。该策略能灵活协调风机和储能设备的有功输出，在不同风速下实现良好的虚拟惯量控制。但是该策略对双馈风力发电机频率控制策略的论述比较简单，没有深入分析不同控制策略的原理、优缺点，也未与其他策略进行对比，无法判断该策略创新之处的优劣。文献[20]建立了考虑储能寿命和参与调频服务的风储联合运行优化模型，可以提高风储联合运行的经济性，但是仅从储能的角度出发建立模型，没有考虑风电场为配合储能运行而采取的运行策略、风电场的调度策略和风电场的调度策略对风储联合运行的影响。

综上所述，目前所提出的调频控制策略，在高渗透率地区，对于复杂的运行状况，仅依靠储能单元调频并不能达到理想的调频效果，而且现在的储能控制技术普遍存在安全性低、储能寿命短的问题，关于风电-储能协同实现电网一次频率调节的研究比较少，故本文从协同调频角度实现 PFRC 的改进。

为满足系统能在高渗透率地区达到理想的调频效果同时兼顾储能寿命，本文以高渗透率下风储调频系统为研究对象。首先，分析了渗透率对电力系统频率和稳定性影响，并针对风储协同 PFRC 系统，分析了定常数控制存在的问题，为之后控制的改进奠定基础。其次，将 SOC 及渗透率因子引入到风储协同 PFRC 中，以解决定常数控制存在的问题。然后，提出自适应风电-储能协同调频控制策略。最后，通过在 Simulink 中搭建区域电网模型，

在阶跃扰动、连续扰动等工况下验证所提的风电-储能协同综合调频控制策略的可行性。

1 风电渗透率对电力系统的影响分析

1.1 传统火电机组频率响应模型

传统火电机组控制结构如图 1 所示，其主要由调速器、再热汽轮机和同步发电机等组成。图中：K_{g0} 为单位调节功率系数；ω_{ref}、ω_{grid}、$\Delta\omega$ 分别为电网频率参考值、电网频率、频率差值，且 $\Delta\omega=\omega_{ref}-\omega_{grid}$；$T_g$ 为调速系统延时时间常数；采用传统再热汽轮机，T_{RH}、T_{CH}、F_{HP} 分别为再热器时间常数、汽轮机时间常数、再热器增益；P_{grid} 和 P_L 分别为同步发电机组功率和负荷功率；M_0 和 D 分别为同步发电机组的惯性时间常数和等效阻尼系数。传统发电机组主要依靠调速系统来调频系统频率，根据电网频率偏差的变化情况，增加/降低同步发电机的出力，补偿系统的功率缺额，从而使频率稳定。

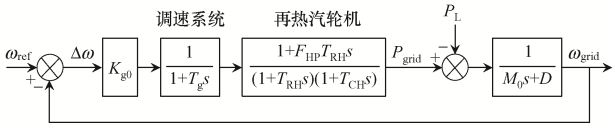


图 1 火电机组控制结构

Fig. 1 Control structure of thermal power unit

1.2 高渗透率下的区域电网频率响应模型

本文定义风电渗透率 δ 为风力发电功率与系统总负荷的比值，即 $\delta=P_{wind}/P_L$，其中，P_{wind} 为风力发电输出功率。在高渗透率地区，随着风电机组在系统中的比例逐渐增大，即渗透率增大，部分传统机组退出运行，从而影响系统整体惯性[21]，对传统机组的 M_0 和 D 产生影响，具体表现为

$$\begin{cases} K_g=(1-\delta)K_{g0} \\ M=(1-\delta)M_0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：K_g 和 M 分别为渗透率影响下的单位调节功率系数和惯性时间常数。则考虑风电渗透率影响的传统火电机组控制结构如图 2 所示。

根据图 2，可得系统开环传递函数 $H(s)$ 为

$$H(s)=\frac{K_g(1+F_{HP}T_{RH}s)}{(1+T_g s)(1+T_{CH}s)(1+T_{RH}s)(Ms+D)} \tag{2}$$

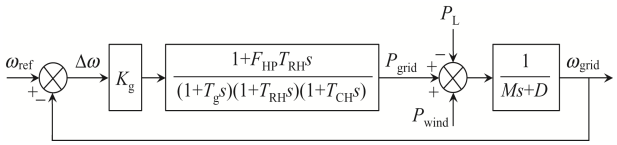


图 2 渗透率影响下的区域电网等效模型

Fig. 2 Equivalent model of regional power grid under influence of permeability

将 T_{RH}、T_{CH}、F_{HP} 等参数代入 $H(s)$ 中，可得考虑 δ 影响的系统开环伯德图如图 3 所示。随着 δ 的增大，系统的幅值裕度(G_m)和相角裕度(P_m)逐渐减小，从而导致系统的稳定性逐渐降低。在极端条件下(δ=100%时)，同步发电机环节完全被风电机组替代，系统不稳定。

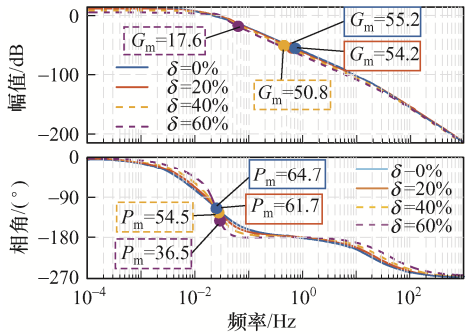


图 3 考虑 δ 的系统开环伯德图

Fig. 3 Open-loop Bode diagram of system considering δ

阶跃扰动条件下，即 $P_L=1/s$，根据图 2 及终值定理可求得闭环系统的电网频率的稳态误差 E_{ss} 为

$$E_{ss}=-\frac{1}{D+K_g} \tag{3}$$

由式(1)~式(3)及图 2 可知，随着 δ 的增大，系统惯性逐渐降低、传统机组出力逐渐减小，同时 K_g 逐渐减小，导致 E_{ss} 和电网频率偏差增大，即随着 δ 的增大，对电网频率的支撑能力和系统的稳定性降低。

2 考虑 SOC 及 δ 的风储协同 PFRC

2.1 风储协同 PFRC 系统模型

储能系统能够增强系统的惯性响应能力，因此

本文在高渗透率地区配置储能系统，由于储能单元容量固定，能够提供的调频能力有限，因此引入具有调频能力的风电机组和储能单元(简称风储)协同支撑系统的频率调节，调频控制等效模型如图 4 所示，风电机组采用含备用容量的直驱风力发电机组，通过网侧变换器并网运行。为了提高对电网的惯性支撑，风电机组及储能系统的功率控制都采用构网型虚拟同步机 VSG(virtual synchronous generator)控制。由于 VSG 时间常数与电力系统时间常数相比较小，因此储能和风电的功率控制都可以等效为一阶惯性环节。图 4 中：P_{ESS}^{*} 和 P_{ESS} 分别为储能功率参考和输出；P_{wind}^{*} 为风电调频功率参考；P_{MPPT}^{*} 为与最大风能跟踪控制相关的参考功率。

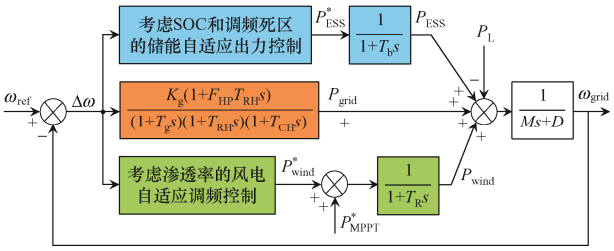


图 4　改进风储协同 PFRC 等效模型

Fig. 4 Equivalent model of improved wind-storage coordinated PFRC

高渗透率地区系统运行状况复杂，为了提高系统的可靠性和电网调频效果，综合考虑 SOC 和 δ 的影响，针对储能调频出力控制和风电出力控制进行改进，本文提出考虑 SOC 及 δ 的自适应风储协同 PFRC，由考虑 SOC 和调频死区的储能自适应一次调频出力控制和考虑渗透率的风电自适应 PFRC 组成。利用该控制策略能够快速、精准出力的特点，更好地解决高渗透率地区存在的电力电子化严重导致的惯性降低以及系统频率波动等问题。提高系统频率的调节能力、改善系统的稳定性，更好地为系统提供惯性支撑。防止储能在运行过程中出现过充/过放的情况，减小储能损耗，同时最大程度上节省储能容量的配置。

2.2 考虑 SOC 和调频死区的储能 PFRC

以减小电池损耗，延长储能寿命为目标，引入 SOC 因子，则储能自适应出力控制可表示为

$$P_{\mathrm{ESS}}^{*}=\Delta\omega\cdot g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC}) \tag{4}$$

式中，$g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})$ 为 PFRC 函数，是与频率和 SOC 相关的函数。在调频过程中储能的出力最大值为 $g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})$ 的最大值与频率偏差最大值的乘积。

2.2.1　储能一次调频启动策略

为了改善由于储能元件频繁充/放电模式切换造成的储能寿命损耗，同时为了简化控制算法，设置储能一次调频死区作为储能一次调频模式启/停及充/放电模式的判断条件，提出根据频率偏差选择性启动储能一次调频的启动策略，启动策略具体工作原理如下。

(1)当频率偏差在储能一次调频死区范围内，即 $-\omega_{\mathrm{star1}}<\Delta\omega<\omega_{\mathrm{star1}}$ 时，ω_{star1} 为一次调频死区阀值，储能一次调频不运行。

(2)当频率偏差 $\Delta\omega>\omega_{\mathrm{star1}}$ 时，储能运行于放电一次调频模式，PFRC 函数 $g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})$ 等于放电下垂系数 $K_{\mathrm{dis,charge}}$，即 $g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})=K_{\mathrm{dis,charge}}$。

(3)当频率偏差 $\Delta\omega<-\omega_{\mathrm{star1}}$ 时，储能运行于充电一次调频模式，PFRC 函数 $g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})$ 等于充电下垂系数 K_{charge}，即 $g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})=K_{\mathrm{charge}}$。

综上所述，含启动策略算法的 PFRC 函数表达式为

$$g_{\mathrm{fr}}(\mathrm{SOC})=\begin{cases}K_{\mathrm{dis,charge}} & \Delta\omega>\omega_{\mathrm{star1}}\\ K_{\mathrm{charge}} & \Delta\omega<-\omega_{\mathrm{star1}}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{5}$$

2.2.2　储能自适应 PFRC 函数

反正切函数法和“Sigmoid”函数法(后文简称“S”函数法)相对于一次函数法属于混合策略，在相同条件下，随着 SOC 数值 S_{OC} 的增大，储能系统首先表现出对 SOC 维持效果的偏好，然后表现出对调频效果的偏好，因此混合策略显著优于其他设计策略。图 5 为一次函数法、反正切函数法和“Sigmoid”函数法的特性对比。当曲线平滑系数 $n=500$ 时，“S”函数法的特性平滑，而反正切函数法的特性在设定 SOC 分段点处出现频率阶跃，且随着 n 值的减小，频率阶跃增大，会导致在分段点处储能出力有突变。因此，本文采用“S”函数作为 PFRC 的核心函数，该函数具有平滑、单调的特点，在整个 SOC 区间内能够连续出力，且

能够根据 SOC 自适应调整下垂系数，兼顾调频效果与 SOC 状态。该函数参数设计简单，只需要设计最大出力系数 $K_{\max}$ 和曲线平滑系数 n，而且能够忽略在分段点处的阶跃问题。综上可知该函数比较理想。

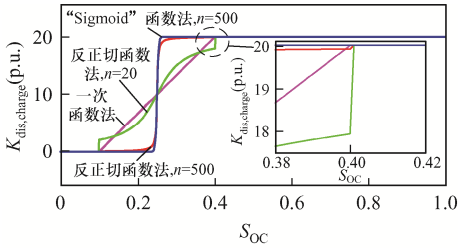


图 5 不同储能自适应函数特性对比

Fig. 5 Comparison of characteristics among different energy storage adaptive functions

储能自适应下垂控制策略在整个 SOC 区间内取 4 个分段界限值，分别称为最小值 $S_{OC,min}$、偏小值 $S_{OC,low}$、偏大值 $S_{OC,high}$ 和最大值 $S_{OC,max}$，其限值大小分别为 0.1、0.4、0.6、0.9；根据 S_{OC} 的大小自适应调整下垂控制系数，基于“S”函数考虑 SOC 的储能自适应充/放电系数 K_{charge}、$K_{dis,charge}$ 的表达式分别为

$$K_{charge}=\begin{cases}K_{max} & S_{OC}<S_{OC,high}\\ K_{max}\left(1-\dfrac{1}{1+e^{-n(S_{OC}-0.7)}}\right) & S_{OC,high}<S_{OC}<S_{OC,max}\\ 0 & S_{OC}>S_{OC,max}\end{cases} \tag{6}$$

$$K_{dis,charge}=\begin{cases}0 & S_{OC}<S_{OC,min}\\ K_{max}\left(1-\dfrac{1}{1+e^{n(S_{OC}-0.25)}}\right) & S_{OC,min}<S_{OC}<S_{OC,low}\\ K_{max} & S_{OC}>S_{OC,low}\end{cases} \tag{7}$$

调节因子 n 的取值决定曲线的形状。以放电为例，n 取不同值时的下垂控制系数 $K_{dis,charge}$ 的变化曲线如图 6 所示。当 n 值较大时，$K_{dis,charge}$ 仅在较短的一段区间内有较大的变化，难以达到自适应调节的效果；当 n 值较小时，在设定的 SOC 分段点处出现较大的频率阶跃，从而降低调频的效果。因此为兼顾调频效果与提高储能调频的自适应性，n 取值为 35，此时的下垂系数变化曲线如图 7 所示。

可以看出，当储能放电时，$K_{dis,charge}$ 在 SOC 处于较高状态($S_{OC}>S_{OC,high}$)时取最大值，储能以最大功率放电达到理想的调频效果；当 SOC 处于较低状态($S_{OC}<S_{OC,low}$)时，根据反馈的 SOC 值自适应调整 $K_{dis,charge}$ 减小储能出力，避免电池过放；当储能充电时，K_{charge} 的变化趋势与储能放电时相反，有效避免储能过充，在整个充放电过程中有效地减小损耗，达到兼顾调频效果与维持 SOC 在最佳状态的目的。

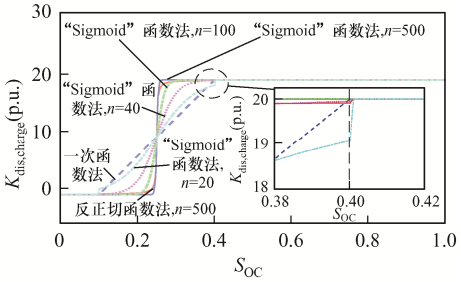


图 6 $K_{dis,charge}$-S_{OC} 的变化曲线

Fig. 6 Curves of $K_{dis,charge}$-S_{OC}

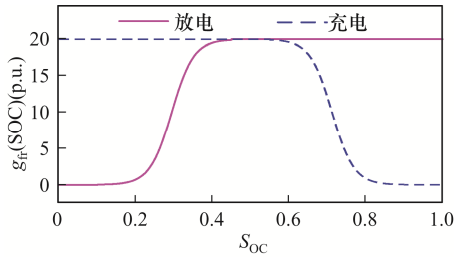


图 7 系数 g_{fr}(SOC)的变化曲线

Fig. 7 Curves of coefficient g_{fr}(SOC)

2.2.3 风储协同调频控制策略

根据 2.2.1 节启动控制策略及 2.2.2 节控制函数得到风储协调调频出力控制如图 8 所示，具体的出力控制策略如下。

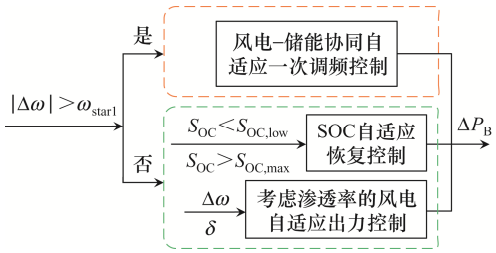


图 8 风储自适应协同调频控制策略

Fig. 8 Wind-storage adaptive coordinated frequency regulation control strategy

(1)死区外调频控制策略

当电网频率超过调频死区时，采用新能源和储能协同一次调频控制，同时为使储能合理且经济地参加一次调频，此时控制受 S_{OC}、Δf 以及 $\Delta\delta$ 三重约束，可以使区域电网在高渗透率地区运行时，储能在实时调频的同时受到储能 SOC 的限制，以防止过充、过放现象，提高储能系统的可靠性，同时改善单一储能调频效果不佳的问题。

(2)死区内调频及 SOC 自恢复控制策略

当电网频率处于调频死区内时，新能源自适应一次调频控制正常，处于运行状态。如果 SOC 处于理想状态，储能正常支撑其他运行模式运行；如果 SOC 处于不理想状态，则启动 SOC 自恢复控制策略。这样可以保证达到理想的调频效果，在减小电池损耗的同时，保证储能在最大程度上实现多模式运行。

2.3 考虑 δ 的风电自适应 PFRC 策略

在高渗透率地区，引入渗透率 δ 作为影响因子，提出考虑渗透率的风电自适应 PFRC，控制结构如图 9 所示。根据 δ 的大小，实时调整补偿的功率，调频出力控制表达式为

$$P^*_{\text{wind}} = \Delta\omega \cdot g_{\text{rec}}(\delta) \tag{8}$$

式中，$g_{\text{rec}}(\delta)$ 为控制的核心。

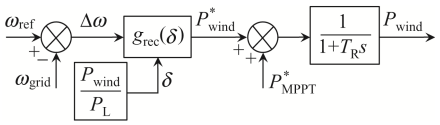


图 9　考虑 δ 的风电 PFRC 结构

Fig. 9 Structure of wind power PFRC considering δ

由于风力发电系统的装机容量不断增加，δ 增大，根据预测的未来渗透率能够达到的等级，选取 20%、55%、80%共 3 个节点[22]，将整个 δ(0~100%)区间分成 4 个部分，如图 10 所示。根据 $\delta = P_{\text{wind}}/P_{\text{L}}$ 计算得到 δ，实时改变下垂控制出力系数 $g_{\text{rec}}(\delta)$ 的大小，从而改变风电机组出力，支撑系统频率的调节和改善系统的稳定性。当 δ<20%时，渗透率较低，设定风电出力控制系数(标幺值)为 $g_{\text{rec}}(\delta)=2$；当检测到渗透率逐渐增大，且超过设定的分区界限时，则根据 δ 自适应调整下垂出力系数 $g_{\text{rec}}(\delta)$，保证系统的调频效果。

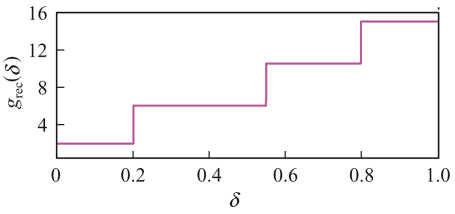


图 10　系数 $g_{\text{rec}}(\delta)$ 变化曲线

Fig. 10 Curve of coefficient $g_{\text{rec}}(\delta)$

阶跃扰动条件下，根据图 4 及终值定理，自适应风储协同 PFRC 的电网频率稳态误差为

$$E_{\text{ss1}} = -\frac{1}{D + K_{\text{g}} + g_{\text{fr}}(\text{SOC}) + g_{\text{rec}}(\delta)} \tag{9}$$

对比式(3)和式(9)可知，自适应风储协同 PFRC 下渗透率增大，频率偏差增大，但由于分母增加了 $g_{\text{fr}}(\text{SOC})$ 和 $g_{\text{rec}}(\delta)$ 项，导致其频率稳态误差小于单一传统机组的误差，即稳态性能得到大幅提升。

3　实例分析

根据图 11 在 MATLAB/Simulink 中搭建高渗透率区域电网 PFRC 仿真模型，主要包括风电发电单元、传统机组、储能单元和负载 4 部分。其中，传统机组额定功率为 100 MW，风力发电机组额定功率为 50 MW，配置储能电池功率为1 MW/500 kW·h，基准频率 50 Hz。控制参数按照 S_{B}=1 MW 进行标幺化，标幺后的仿真系统详细参数：T_{g}=0.08，T_{RH}= 10，M_0=20，K_{g0}=20，T_{R}=0.2，T_{CH}=0.3，F_{HP}=0.5，D=2，T_{b}=0.02。通过阶跃、连续负载扰动验证所提 PFRC 策略的可行性。

3.1 阶跃负荷扰动一次调频实例分析

仿真对比阶跃负荷扰动下考虑渗透率影响的传统机组调频、储能调频及风电和储能协同控制策略的调频特性。在 t=50 s 时在系统中加入大小为 2 p.u.的阶跃负荷扰动，设置初始 S_{OC}=0.5，对不同控制控制策略进行仿真分析，得到不同控制策略的电网频率偏差曲线如图 12 所示。储能调频控制策略和考虑储能寿命及渗透率的自适应风储协同 PFRC，二者对于电网频率的跌落深度及稳态频率

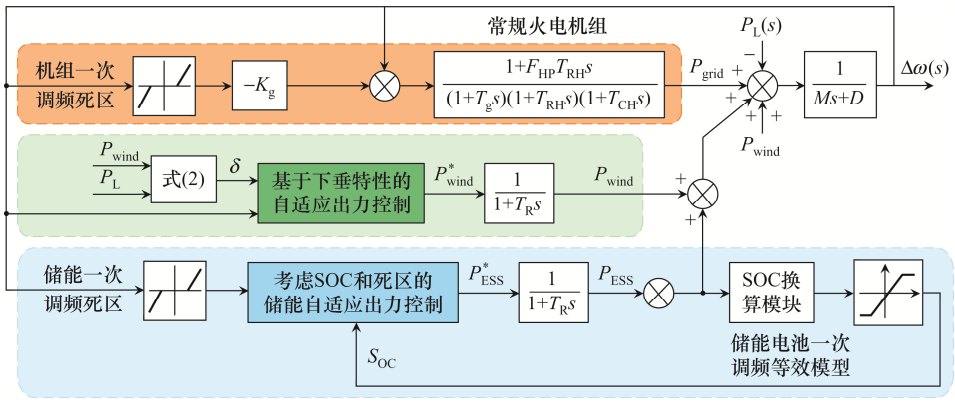


图 11 区域电网 PFRC 等效模型

Fig. 11 Equivalent model of PFRC of regional power grid

偏差都有所改善，但是风储协同调频控制对频率偏差改善的效果更好。

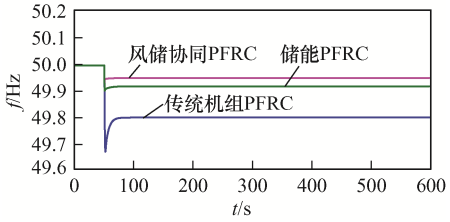


图 12 电网频率偏差变化

Fig. 12 Variation in grid frequency deviation

仿真验证储能自适应 PFRC 中调频死区大小对调频效果的影响，如图 13 所示，100 s 时在系统中加入大小为 1 p.u.的阶跃负荷扰动，得到不同大小储能调频死区下的电网频率偏差曲线如图13所示。储能调频死区越大，调频效果越差，但是当储能调频死区特别小时，储能单元会频繁动作，加大储能的损耗。因此本文综合考虑调频效果和储能损耗，选取储能一次调频死区边界为 ±0.02 。

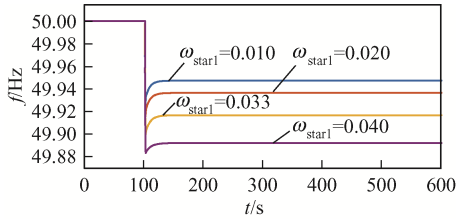


图 13 不同调频死区下频率偏差

Fig. 13 Frequency deviation under different frequency regulation dead-zones

3.2 连续负荷扰动一次调频实例分析

600 s 连续负荷扰动如图 14 所示，图 15 为采用传统机组 PFRC，连续负荷扰动下不同渗透率的电网频率偏差曲线。随着 δ 的逐渐增加，频率偏差逐渐增大，而且当 δ 达到一定程度时，电网频率偏离额定值的差值较大，严重影响系统稳定性。

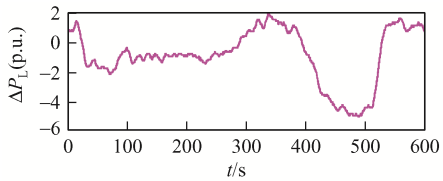


图 14 连续负荷扰动曲线

Fig. 14 Curve of continuous load disturbance

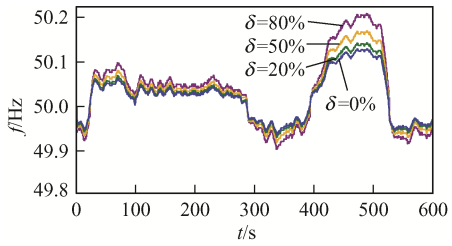


图 15 600 s 电网频率偏差变化曲线

Fig. 15 Curves of grid frequency deviation during period of 600 s

进一步验证风电渗透率为 40%的前提下，不同调频控制策略在 600 s 连续负荷扰动下的调频特性，图 16 为电网频率偏差变化曲线，图 17 为 S_{OC} 变化曲线。根据电网频率偏差曲线可知，当采用储能调频控制策略时，在 δ 影响下，由于部分传统机组被风电发电机组代替，系统整体的惯性降低，只有储能单元和部分传统机组支撑系统频率调节，相对传统机组 PFRC，频率偏差都有所改善，根据文献[23]频率和 SOC 质量计算方法，可知最大频率差值由传统机组 PFRC 下 50.180 Hz 减小为 50.115 Hz，

但仍然比较大。当采用风储协同自适应 PFRC 时，由风电机组和储能以及剩余的传统机组支撑频率的调节，此时能够达到很好的调频效果，频率质量由 3.966 变为 1.676。从储能 SOC 变化曲线可知，采用储能调频控制时，储能进行充电调频且充电功率比较大，但调频效果并不理想。而采用风储协同自适应 PFRC 时，储能充电功率较小，也能够达到很好的调频效果，且 SOC 状态较好，SOC 质量由 0.064 07 变为 0.016 48。

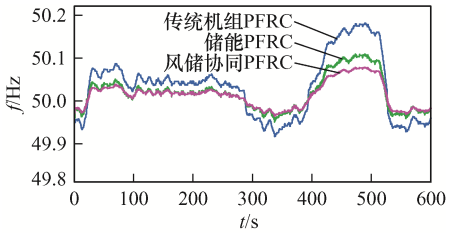


图 16　电网频率偏差变化曲线

Fig. 16 Curves of grid frequency deviation

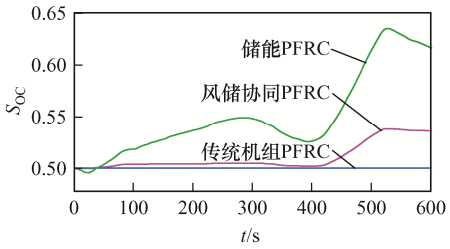


图 17　储能 SOC 变化曲线

Fig. 17 Curves of SOC of energy storage

综上分析可知，本文提出的考虑 SOC 及渗透率的自适应风储协同 PFRC 能够在达到理想调频效果的同时节省储能出力，使 SOC 维持在最佳状态附近，从而在配置储能容量时也能够节约成本。

4　结论

本文提出 1 种考虑渗透率的风储协同 PFRC 策略，并得出以下结论。

(1)针对 PFRC，本文从渗透率对电力系统影响的角度出发，分析渗透率对系统调频效果的影响，最终提出考虑 SOC 及渗透率影响的自适应风储协同 PFRC，通过设置储能自适应一次调频调节系数和调频死区，实时调节渗透率下风电出力，实现风电-储能单元的协同调频控制，有效地改善了电网调频效果，提高了系统的稳定性，防止储能在运行过程中出现过充/过放的情况，减小储能损耗并优化储能容量的配置。

(2)本文以新能源发电为背景，讨论风力发电渗透率对系统的影响，从而提出增强调频效果的控制策略，以此为基础可以推广至光伏等新能源发电单元对系统的影响。

参考文献：

[1] 马一峰, 杨乐, 贾晟, 等. 可再生能源微网电源小信号稳定性分析[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 70-75.
Ma Yifeng, Yang Le, Jia Sheng, et al. Analysis of small signal stability of micro-grid power supply with renewable energy [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 70-75. (in Chinese)

[2] 陈石明, 范烨, 刘晶. 智能电网内规模化分布式电池储能系统的调频控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 120-131.
Chen Shiming, Fan Ye, Liu Jing. Frequency modulation control method for large-scale distributed battery energy storage systems in smart grid [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 120-131. (in Chinese)

[3] 苗福丰, 唐西胜, 齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2209-2216.
Miao Fufeng, Tang Xisheng, Qi Zhiping. Analysis of frequency characteristics of power system based on wind farm-energy storage combined frequency regulation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2209-2216. (in Chinese)

[4] Yan Gangui, Liu Dongyuan, Li Junhui, 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): 1-9.

[5] Izadkhast S, Garcia-Gonzalez P, Frías P, et al. Design of plug-in electric vehicle's frequency-droop controller for primary frequency control and performance assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4241-4254.

[6] 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. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 张波, 张晓磊, 贾焦心, 等. 基于惯量支撑和一次调频需求的 VSG 储能单元配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 202-209.

Zhang Bo, Zhang Xiaolei, Jia Jiaoxin, et al. Configuration method for energy storage unit of virtual synchronous generator based on requirements of inertia support and primary frequency regulation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 202-209. (in Chinese)

[9] 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. (in Chinese)

[10] 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. (in Chinese)

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

[12] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与SOC基点的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 1-10.

Li Junhui, Gao Zhuo, Ying Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10. (in Chinese)

[13] Kerdphol T, Watanabe M, Hongesombut K, et al. Self-adaptive virtual inertia control-based fuzzy logic to improve frequency stability of microgrid with high renewable penetration [J]. IEEE Access, 2019, 7: 76071-76083.

[14] 虞临波, 寇鹏, 冯玉涛, 等. 风储联合发电系统参与频率响应的模型预测控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 36-43.

Yu Linbo, Kou Peng, Feng Yutao, et al. Model predictive control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 36-43. (in Chinese)

[15] Bao Weiyu, Wu Qiuwei, Ding Lei, et al. Synthetic inertial control of wind farm with BESS based on model predictive control [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(13): 2447-2455.

[16] Qu Liyan, Qiao Wei. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 359-367.

[17] Ngamroo I, Karaipoom T. Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(5): 5700805.

[18] 李军徽, 李婧, 朱星旭, 等. 风储联合系统分风速一次调频协同控制策略[J]. 吉林电力, 2023, 51(6): 7-12.

Li Junhui, Li Jing, Zhu Xingxu, et al. Coordinated control strategy of primary frequency modulation for wind storage joint participation system [J]. Jilin Electric Power, 2023, 51(6): 7-12. (in Chinese)

[19] 何光层, 张栋梁, 朱红杰, 等. 考虑风储协调运行的频率控制策略研究[J]. 电工技术, 2020(11): 9-13, 147.

He Guangceng, Zhang Dongliang, Zhu Hongjie, et al.

Research on frequency control strategy considering coordinated operation of wind power storage [J]. Electric Engineering, 2020(11): 9-13, 147. (in Chinese)

[20] 匡生, 王蓓蓓. 考虑储能寿命和参与调频服务的风储联合运行优化策略[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 73-78.
Kuang Sheng, Wang Beibei. Optimization strategy of wind storage joint operation considering energy storage life and participating in frequency modulation service [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 73-78. (in Chinese)

[21] 张宇泽. 大规模风电接入对电力系统 AGC 控制参数的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
Zhang Yuze. Effect of large scale wind power integration on power system AGC control parameters [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese)

[22] Liu Laibao, Wang Yang, Wang Zheng, et al. Potential contributions of wind and solar power to China's carbon neutrality [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106155.

[23] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.
Liu Yingpei, Tian Shijie, Liang Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118. (in Chinese)



柴秀慧

作者简介：

柴秀慧(1984—)，女，博士，讲师。研究方向：风力发电变流器及控制技术，储能系统功率流控制。E-mail：caixiuhuihb@126.com。

车任达(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：储能调频，削峰填谷。E-mail：1341106683@qq.com。

王晓寰(1980—)，女，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：分布式发电系统并网控制技术。E-mail：wxh@ysu.edu.cn。

张纯江(1961—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子变流技术，光伏风力发电及控制。E-mail：zhangcj@ysu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)