

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.021

计及风速的风—火—储系统联合调频控制策略

李明, 亚夏尔·吐尔洪, 郑云平

(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 随着新能源装机规模的逐年递增,以风电为代表的新能源得到快速发展,为降低新能源大规模并网对电力系统频率稳定性的影响,可充分利用电池储能系统安全、快速、精确控制特性,实现风储系统辅助传统火电机组改善电网频率的稳定快速调节作用。首先构建了风储系统联合传统火电机组的复合控制模型,通过应用模糊控制规则将风速及频率微增量等输入转化为虚拟惯性系数 K_p 与下垂控制系数 K_d ,对不同风速、不同荷电状态下的多种组合工况输出频率、功率波形进行对比分析,分析了风速大小对风储系统一次调频过程的影响,同时验证了计及风速的一次调频控制策略有效性。

关键词: 风储系统; 荷电状态; 风速; 一次调频; 模糊控制

Joint Frequency Regulation Control Strategy for Wind-thermal-storage Systems Considering Wind Speed

LI Ming, YAXIAER Tuerhong, ZHENG Yunping

(Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: With the annual increases in installed capacity of renewable energy, new energy sources represented by wind power have developed rapidly. To mitigate the impact of large-scale grid integration of renewable energy on the frequency stability of power systems, the safe, fast, and precisely controllable characteristics of battery energy storage systems can be fully utilized to enable wind-storage systems to assist traditional thermal power units in achieving stable and rapid frequency regulation of the power grid. First, a composite control model of the wind-storage system combined with traditional thermal power units is constructed. By applying fuzzy control rules, such inputs as wind speed and frequency micro-increments are transformed into the virtual inertia coefficient K_p and the droop control coefficient K_d . The frequency and power output waveforms under various combined operating conditions with different wind speeds and different states of charge are compared and analyzed. The influence of wind speed on the primary frequency regulation process of the wind-storage system is analyzed, and the effectiveness of the primary frequency regulation control strategy considering wind speed is verified.

Key words: wind storage system; SOC; wind speed; primary frequency regulation; fuzzy control

0 引言

为解决高占比分布式能源接入电力系统导致主网频率不稳定等问题,如何保持电力系统安全稳定运行成为当前领域研究重点。由于自动发电控制(automatic generation control, AGC)频繁改变出力导致设备老化等疑难问题,且常规机组调频方式过

程复杂,无法有效改善和适应电力新系统的发展要求^[1-3]。储能系统可以迅速、准确地控制功率输出、吸收,且瞬时功率较大,是电力系统中的一项重要调频手段。诸多储能类型中,电池储能系统控制性能良好,输出稳定,在频率调节领域得到广泛应用^[4-7]。目前,储能作为重要媒介辅助电力系统进行频率调整得到了政府、企业的众多相关政策支持,《关于促

进电化学储能健康有序发展的指导意见》对此有明确的规定:正常工况下,储能系统参与电力系统频率调节的时间应大于15 min,同时鼓励用户侧积极参与储能系统的响应,回馈电网侧。目前,中国电力行业改革正在稳步推进,电池储能系统(battery energy storage system, BESS)作为存在利润的辅助业务进入市场的趋势也在增强,同时也在推动中国储能领域的优质发展。储能参与调频的方式通常有以下几种:直接参与、通过辅助机组参与、联合风光调频等^[8]。实际应用中,储能联合常规机组参与调频的方式最为常见。通常,储能系统与变压器低压侧连接^[9]。当前,中国已有数目较多的储能电站投产运行中,在消纳新能源出力、平抑功率、电网调度等工作中具有重要地位。

在电力系统中,频率往往会出现较大波动,如果将其控制在正常范围内,会导致能源浪费、设备故障甚至电力系统崩溃等后果,但储能单元电池荷电量有一定局限性,且储能电站需不断切换充放电状态,从而导致大容量储能站调频能力受限^[10]。储能系统在抑制频率波动,调节出力的过程中所需容量不大,且成本低廉。大容量储能电站配置灵活,可根据不同种类系统实现多时间尺度调频应用:一次调频针对波动幅度小,周期较短的负荷波动;二次调频主要针对周期较长的负荷波动;三次调频主要适用于发电厂,也称为经济调度^[11]。各类调频策略相互结合,可以满足电力系统不同电压等级、不同容量、不同应用场景的调频需求。

通常情况下,电网的一次调频是通过负荷本身的频率特性和调频机组共同完成,但此过程涉及多种能源形式转换,过程较复杂。如果风电机组单独参与调频,在一次调频过程中易导致系统频率的二次上升或跌落;如果锂电池储能系统单独参与调频,其所需容量配置过大且未能充分利用风机可参与电力系统调频的性能。因此,在应用传统火电机组一次调频出力的基础之上,如何先后发挥风电和储能的调频性能,结合两者各自优势,构成风储联合发电系统参与电力系统一次调频是文中研究的重点。

为应对高占比风光接入对电力系统造成的影响,如何充分利用电池储能系统与机组联合参与辅助传统火电机组调频是当下研究的热点之一^[12]。文[1,13]分别计及电池储能系统的容量和功率等影响因素,均基于荷电状态SOC提出一种自适应调频控制策略,且验证了在各自新策略下电池储能调频系统仿真波形效果上更优,精确度更高;文[14]对比

了电池储能系统参与电网调频的两种控制策略,输出波形优化效果基本相同,但模糊控制所需储能容量更小,潜在经济价值更高;文[15]基于储能系统荷电状态SOC的数值大小提出一种储能充放电控制策略,通过设定安全阈值限制电池充放电时间,从而实现电池储能系统的安全运行。

1 联合调频控制模型

风储系统通过模拟传统火电机组的下垂特性与惯性控制参与系统一次调频,且风储系统联合传统火电机组参与一次调频需依据频率偏差值及死区限制^[8],储能系统下垂特性示意图见图1。储能系统可以通过多个储能变流器(power conversion system, PCS)组合实现其自身控制功能,设定储能系统输出功率大小及时间。当频率偏差值达到动作范围内时,储能系统开始向电网输送或吸收电能,反之不动作。

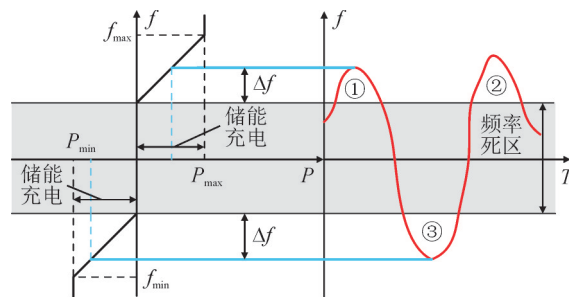


图1 储能系统下垂特性分析

Fig. 1 Analysis of sag characteristics of energy storage system

储能系统存在动作范围死区:当机组接近额定转速时,对转速的变化反应不太明显,此范围即为系统动作死区,见图1中①、②区域,此时电能由电网侧传输至储能系统;③区域表示电能由储能系统传输至电网侧。下垂特性中传统机组通过单位调节功率改变出力大小,实现频率自动响应,但储能系统中,虚拟惯性控制通过储存传统电源旋转惯量中的动能来支撑电网,不同的控制模型的示意图见图2。

图2中: $-K_e$ 为储能系统的虚拟单位调节功率; $-M_e$ 为储能系统的虚拟惯性系数; M 为电网惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数; $G(s)$ 、 $N(s)$ 分别为传统机组和储能系统的传递函数; K_c 为单位调节功率。虚拟下垂控制与惯性控制可以抑制系统频率偏差,下垂控制主要作用于稳态频率偏差,惯性控制则主要作用于系统频差变换率初值。为了达到更精准、有效的辅助调频效果,可以通过结合两种

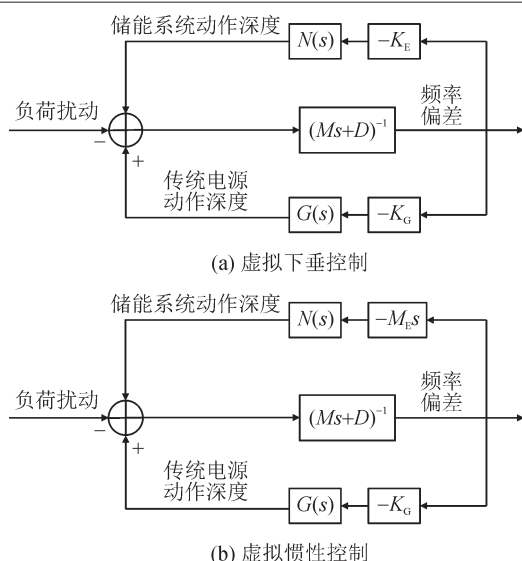


图2 一次调频中储能系统的动态模型

Fig. 2 Dynamic model of energy storage system participating in primary frequency regulation

控制模式的方法实现。储能系统参与一次调频的原理图见图3。图3中: P_{L1} 、 P_{L2} 分别为工频条件下不同功率情况的负荷侧特性; P_G 为工频条件下的电源侧静态特性。

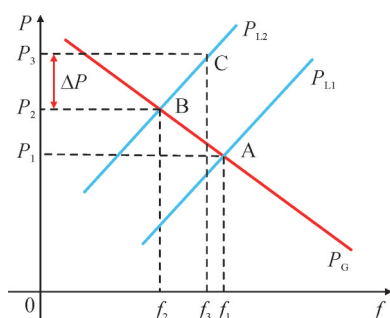


图3 储能一次调频原理图

Fig. 3 Schematic diagram of energy storage primary frequency regulation

假定电源侧与用户侧的初始频率均为 f_1 , 平稳运行于A点, 当负荷侧突然产生波动, 电源的有功输出仍保持初始值, 无法快速改变输出, 转子转速降低, 系统频率下降至 f_2 。根据图3, 负荷曲线由 P_{L1} 变化为 P_{L2} , 系统重新稳定运行于B点。当储能系统工作, 输出有功 ΔP , 运行点会再次改变B至C点, 频率上升至 f_3 , 可以看出, 相比 f_2 , 系统频率偏差降低, 达到辅助调频的目的。实际工程应用中, 储能辅助参与调频还需要考虑调频死区等因素^[16], 当储能系统监测到电网频率变化超出死区时, 可结合储能系统与传统一次调频机组, 使频率迅速恢复至正常范围。传统机组一次调频中辅以储能系统见图4。如图4所示, 电源侧工频曲线 P_G 与负荷侧曲线 P_{L1} 初始相交于点A, 当负荷突增时, P_{L1} 移动至 P_{L2} , 重新相交

于B点, 此时储能系统释放功率 ΔP , 频率回升至 f_3 。

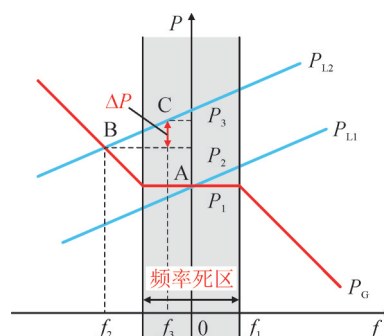


图4 传统机组一次调频中辅以储能系统

Fig. 4 Energy storage system assists traditional unit primary frequency regulation

电池储能系统辅助参与传统一次调频的原理为

$$K_S = K_G + K_L + K_B \quad (1)$$

式(1)中: K_G 为传统机组的频率调节系数; K_L 为负荷频率调节系数; K_B 为电池储能系统的频率调节系数。储能系统联合传统机组参与一次调频可以降低传统机组动作次数, 延长设备寿命, 同时减少传统机组响应时间造成的缺陷。但考虑电池在快速充放电过程中, SOC的变化会导致电池内部参数、性能发生改变, 因此 K_B 并非恒定值, 考虑使用分段控制方法, 见表1。

表1 频率调节系数与SOC函数关系

Table 1 The relationship between frequency regulation coefficient and SOC function

区段	充放电状态	调节系数
[SOC ₁ , SOC ₂]	充电为主, 适当减少	$K_{Bc} = K_{\max}$
	放电功率	$K_{Bf} = K_{\max} \left(\frac{SOC - SOC_1}{SOC_2 - SOC_1} \right)^n$
[SOC ₂ , SOC ₃]	最大单位功率调节	$K_{Bf} = K_{Bc} = K_{\max}$
[SOC ₃ , SOC ₄]	放电为主, 适当减少	$K_{Bc} = K_{\max}$
	充电功率	$K_{Bc} = K_{\max} \left(\frac{SOC - SOC_3}{SOC_4 - SOC_3} \right)^n$

表1中: K_{Bc} 为充电功率调节系数; K_{Bf} 为电池放电功率调节系数。同时, n 值取决于调频效果, 调频效果越显著, n 值越小。从表1可以得到结论: 当电池SOC位于[SOC₁, SOC₂]范围内时, 电量较低, 需要补充电量; 当SOC位于[SOC₂, SOC₃]范围内时, 可进行大功率充放电过程, 调频效果最佳; SOC位于[SOC₃, SOC₄]范围内, 电量趋于饱和, 电池储能系统协助调频效果较好, 同时还可以有效延长电池的使用寿命。

储能参与辅助传统机组一次调频流程图见图5。基于图5所示调频原理, 其中在负荷侧产生失稳波动的情况下, 会导致系统功率失衡, 继而导致电力系统频率发生变化, 最后产生一次调频过程, 为保证电力系统频率稳定, 实现电力系统在微电网结构

下的有效运行,综合考虑常规火电机组、风电机组及电池储能系统参与一次调频以及负荷响应需求控制。

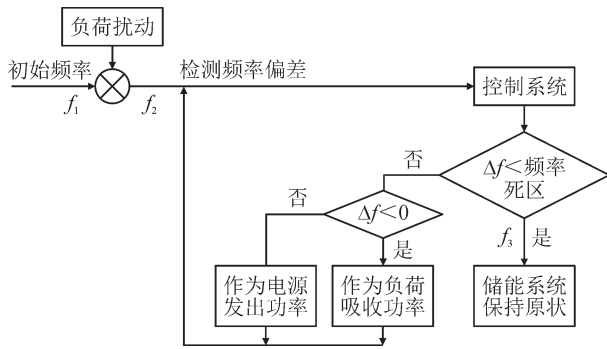


图5 储能参与辅助传统机组一次调频流程图

Fig. 5 Flow chart of energy storage participating in assisting traditional unit primary frequency regulation

2 考虑风速的风—火—储系统一次调频策略

2.1 考虑风速的风—火—储系统联合一次调频控制结构

考虑到在新型微电网系统中传统火电机组、风电机组以及电池储能系统对微电网系统惯量的影响,建立风储系统联合火电机组调频控制模型见图6,即火电机组调频动作时,同时考虑风电机组调频能力与电池储能系统的频率响应过程^[17-22]。

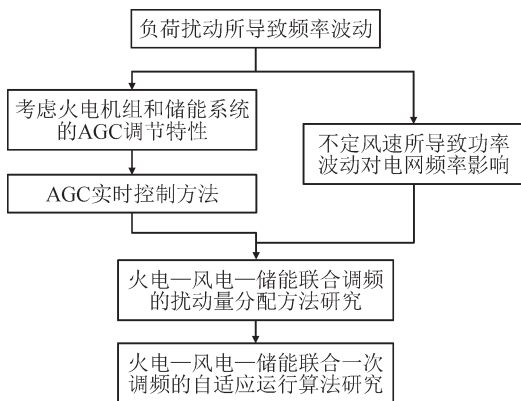


图6 风储系统联合火电机组调频流程图

Fig. 6 Flow chart of frequency regulation concept for wind storage system combined with thermal power units

考虑储能技术的场景应用,可结合虚拟同步机(VSM)等并网逆变器控制技术,实现在轻微故障情况下的有功调节,并搭建一次调频控制模型见图7^[20],其过程可表述为

$$\frac{2(H+H')}{f_0} \frac{d\Delta f(t)}{dt} = \Delta P_{\Sigma G} + \Delta P_{\Sigma V} - D\Delta f(t) - P_{\text{fault}} \quad (2)$$

式(2)中: H 、 H' 为所设电网的同步惯量、虚拟惯量; f_0 、 $\Delta f(t)$ 为系统额定频率和频率偏差; $\Delta P_{\Sigma G}$ 、 $\Delta P_{\Sigma V}$ 分别为传统火电、风电机组参与辅助调频功

率; P_{fault} 为功率扰动; D 为系统阻尼。

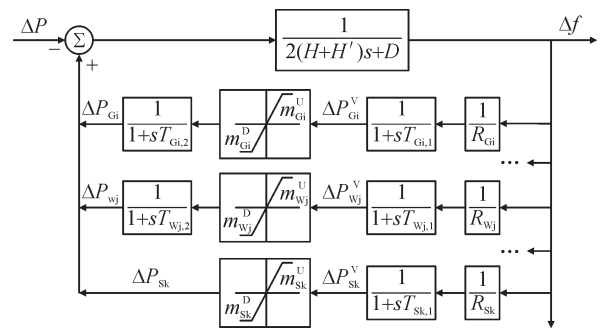


图7 风储系统联合火电机组调频控制模型

Fig. 7 Frequency control model of wind storage system combined with thermal power unit

传统火电机组与风电机组分别由比例环节和限幅环节组成^[23]。图7中: T_G 、 R_G 分别为传统风电机组调速器的调差系数和时间常数, R_W 、 T_W 分别为风电机组调频调差系数与惯性时间常数,而储能系统在上述基础之上予以改动,增设一阶惯性环节,其中 R_{sk} 、 T_{sk} 分别为电池储能系统的等效调差系数和惯性时间常数。考虑到风储系统的虚拟惯性时间常数所受自身影响因素较小,因此可调节范围远远大于传统火电机组。

2.2 考虑风速的风储系统模糊控制器设计

考虑到风能资源的间歇波动性,以及风力大小影响风机转速所导致的风电功率随机性和不可控性,因此需要考虑不同风况条件下风机参与一次调频的能力差异,但风机转速与仿真控制系数之间难以建立精准的数学模型。模糊控制策略相对传统控制相比具备良好的容错性等优点,尤其对于非线性系统具备较好的控制效果,即具备较好的“鲁棒性”,是一种有效实现智能控制的形式^[24-28]。文中采用模糊逻辑控制过程见图8。

模糊控制策略主要包括建立模糊控制规则、模糊决策、模糊量化处理、去模糊化等过程。基于上述原理,建立三输入两输出的模糊控制器模型,经去模糊化等过程之后,可获得模糊控制输出量虚拟惯性系数 K_p 与下垂控制系数 K_d 。

图8中,模糊规则一般情况下由专家经验人工规定,输入变量模糊化是将输入量依据模糊规则进行规范处理,并进行相关尺度变换,得到相关模糊结果,最后将所得结果依据模糊规则转变为精确量进行输出^[29]。

当风速较小时,风电机组参与调频能力较弱,虚拟惯性系数 K_d 应取较小值,电池储能系统承担较大调频任务, K_d 与下垂控制系数 K_p 应随频差变化率增大而增大;当风速适中时,风电机组参与调频能

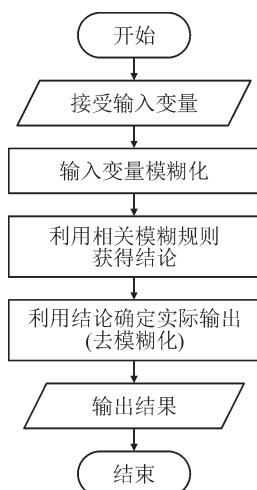


图8 模糊逻辑执行流程图

Fig. 8 Fuzzy logic execution flowchart

力较强, 频差变化率越大, K_d 随之减小, K_p 应随之增大; 当风速过大时, 易导致风机损坏, 为避免动能释放过度, 应适当降低风电机组转速, 风电机组参与调频能力较弱, 即 K_d 应随之减小, K_p 随之增大。基于上述理论分析, 建立模糊控制规则如下表所示: 其中输入(风速大小 v 、频率变化率 $d\Delta f/dt$ 、频率偏差 Δf)、输出(虚拟惯性控制系数 K_d 、下垂控制系数 K_p) 模糊子集均为{VS(很小)、S(小)、M(中)、B(大)、VB(很大)}, 并得到响应隶属度函数, 见图9。

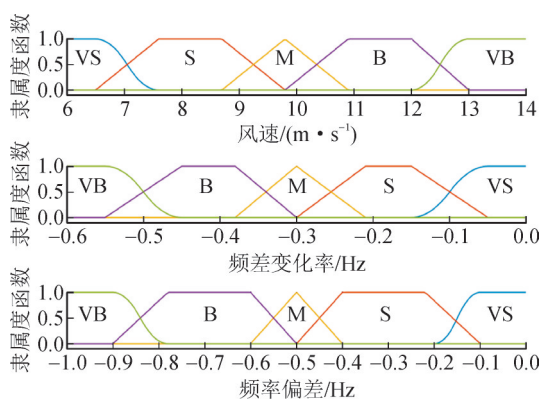


图9 输入隶属度函数

Fig. 9 Input membership function

其中输出权重隶属度函数见图10。取不同基础风速 v 为恒定适当值, 可取频差变化率 $d\Delta f/dt$ 与频率偏差 Δf 分别为 X 、 Y 轴, 以虚拟惯性系数 K_d 、下垂控制系数 K_p 为 Z 轴的三维关系图。当设定基础风速为 9 m/s 时, 情况见图11、12。

当风速为 9 m/s 时, 在负荷波动导致的频率变化量绝对值增大过程中, 储能下垂控制系数 K_p 逐级增大, 但虚拟惯性系数 K_d 在前期出现轻微波动, 当变化量大于 0.9 Hz 时, K_d 出现较大数值变化; 此外, 不难发现随着 $d\Delta f/dt$ 增大, K_p 逐级增大, K_d 逐级减

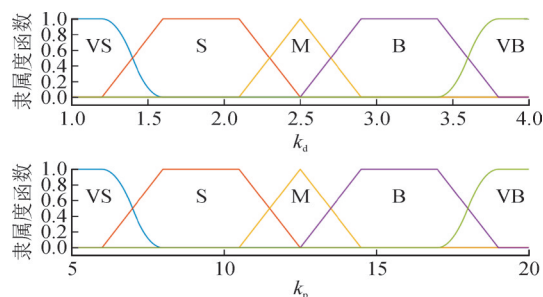
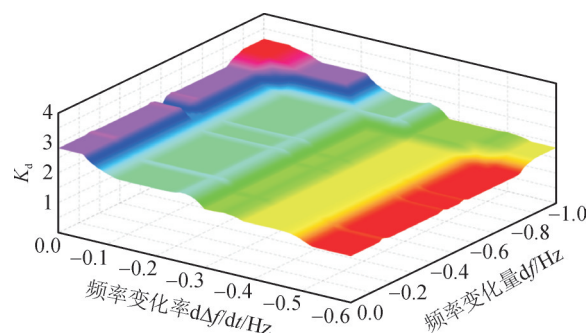
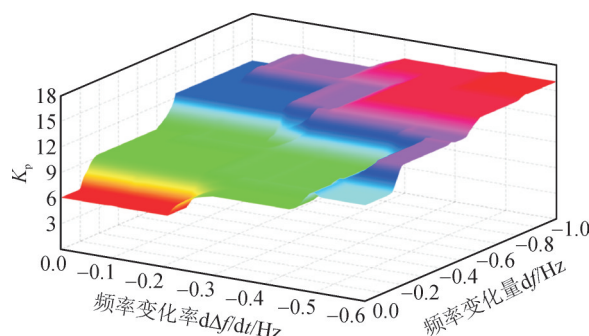


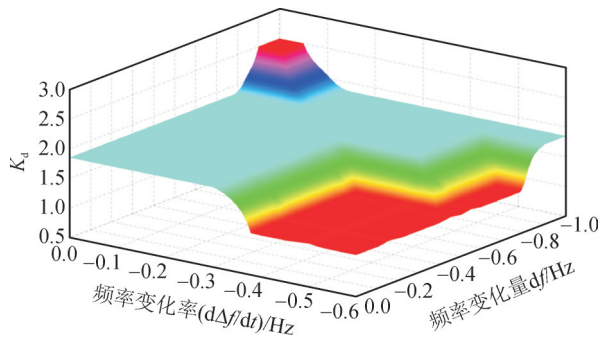
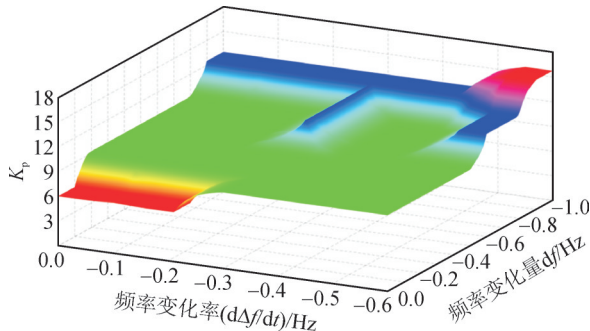
图10 输出隶属度函数

Fig. 10 Output membership function

图11 K_d 与 df 、 $d\Delta f/dt$ 对应函数关系($v=9$ m/s)Fig. 11 Corresponding function relationship of K_d and df 、 $d\Delta f/dt$ ($v=9$ m/s)图12 K_p 与 df 、 $d\Delta f/dt$ 对应函数关系($v=9$ m/s)Fig. 12 Corresponding function relationship of K_p and df 、 $d\Delta f/dt$ ($v=9$ m/s)

小; 在 $d\Delta f/dt$ 与 df 均取绝对值最大时, K_p 达到最大; 在 $d\Delta f/dt$ 取绝对值最小、 df 取绝对值最大时, K_d 达到最小, 满足前述模糊逻辑规则设定。

当降低风速至 6 m/s 时, 情况见图13、14。降低风速至 6 m/s 时, 在负荷波动导致的 df 绝对值增大过程中, 储能下垂控制系数 K_p 逐级增大, 虚拟惯性系数 K_d 存在轻微波动, 在绝对值大于 0.9 Hz 时, 出现阶跃式增大; 此外, 且不难发现随着 $d\Delta f/dt$ 绝对值的增大, K_p 逐级增大, K_d 逐级减小, 在 $d\Delta f/dt$ 绝对值最大时, K_p 达到最大, K_d 达到最小; 在 df 及 $d\Delta f/dt$ 绝对值均取最大时, K_p 取得最大值; 相反, K_p 则取最小值, 满足模糊逻辑规则设定。

图13 K_d 与 df 、 $d\Delta f/dt$ 对应函数关系($v=6$ m/s)Fig. 13 Corresponding function relationship of K_d and df 、 $d\Delta f/dt$ ($v=6$ m/s)图14 K_p 与 df 、 $d\Delta f/dt$ 对应函数关系($v=6$ m/s)Fig. 14 Corresponding function relationship of K_p and df 、 $d\Delta f/dt$ ($v=6$ m/s)

3 仿真分析与结果讨论

3.1 仿真参数与工况设计

为验证上述理论分析的可行性,文中基于MATLAB/Simulink平台,结合图7所示模型结构,分别在3种组合工况下,搭建计及风速的风储系统联合火电机组参与一次调频仿真模型,相关参数见表2。

表2 仿真参数及工况设定

Table 2 Simulation parameters and operating condition settings

项目	数值
火电机组额定功率/MW	10
电池储能系统功率	1 MW/0.5 MWh
储能系统联结方式	200串210并
SOC设定/%	50、20
风电机组额定功率/MW	5
单体电池标称电压/V	3.6
单体电池标称容量/mAh	3 300
风速设定/($m \cdot s^{-1}$)	6、9
负荷波动时间	$t=1$ s增大负荷、 $t=10$ s减小负荷

Case1:设定初始工况风速为6 m/s,储能系统初始SOC为50%,分别考虑仅有火电机组参与调频、火电与风电固定 K 值与模糊策略联合调频、电池储能系统参与联合一次调频等各子场景的频率变化率、

功率变化曲线波动情况。

Case2:提高设定整体仿真工况风速为9 m/s,并保持锂电池储能系统荷电状态为50%不变化,在负荷侧施加扰动后获得多工况频率变化率、功率输出波形,以验证风速大小对风电机组转速的影响。

Case3:降低电池储能系统初始SOC为20%,即验证在较低荷电状态下储能系统参与一次调频过程中的参数变化,对相关输出波形进行分析,以验证储能系统荷电状态对系统联合参与一次调频的影响。

3.2 仿真结果

Case1:设定较低风速为6 m/s,锂电池储能系统初始荷电状态为50%,分析该工况条件下风储系统联合火电机组参与一次调频过程中因负荷波动所引起的功率、频率变化,输出波形见图15、16。

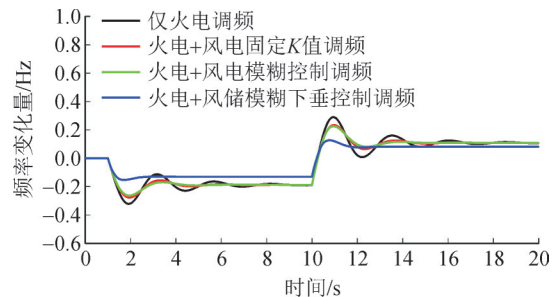
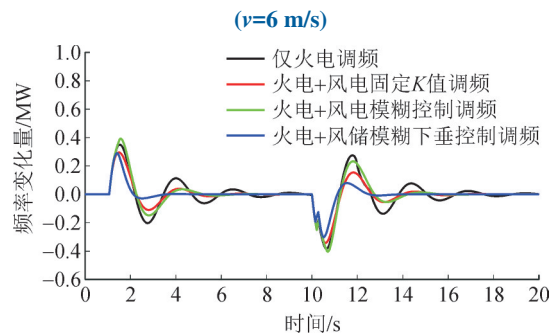
图15 多场景频率变化率($v=6$ m/s)

Fig. 15 Frequency change rate of multiple scenarios

图16 多场景功率变化曲线($v=6$ m/s)Fig. 16 Power change rate of multiple scenarios ($v=6$ m/s)

如图16所示,分别在 $t=1$ s、 $t=10$ s时增加、减少负荷,仅传统火电机组参与一次调频功率、频率均出现较大波动,且平复周期最长;其次考虑到风电机组调节的不确定性,传统火电机组配合风电机组采用模糊控制策略频率调节速度均快于固定 K 值一次调频,验证了设计模糊控制策略参与一次调频的正确性;此外,增加电池储能系统参与模糊控制参与一次调频,在负荷变化约1 s后能够快速恢复系统频率稳定,3 s后功率波动变化数值恢复稳定,且调节过程中频率波动变化量最小约0.2 Hz,最大频率波动数值差额约为0.2 MW,也验证了锂电池储能系

统参与一次调频的优势。综上,可利用传统火电机组与风储系统协同作用,并利用模糊控制策略实现快速一次调频。

Case2:考虑到风速大小对风电机组叶片转速大小的影响,提高风速设定为9 m/s,分析比较计及风速大小的风储系统联合传统火电机组一次调频过程中系统功率、频率波形变化、波线见图17、18。

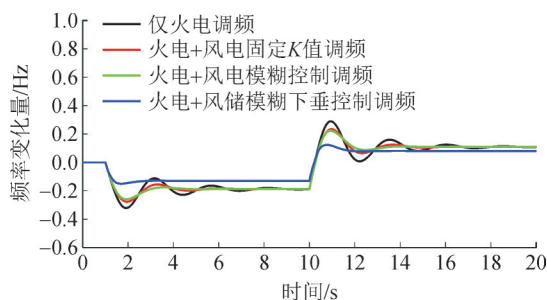


图17 多场景频率变化率($v=9$ m/s)

Fig. 17 Frequency change rate of multiple scenarios

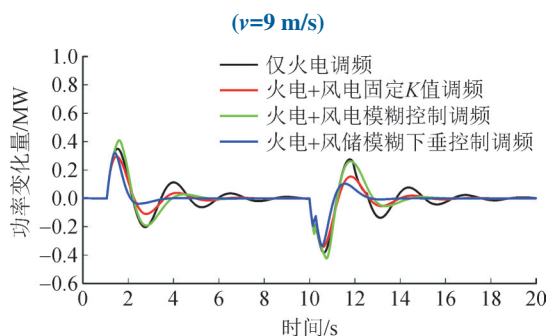


图18 多场景功率变化曲线($v=9$ m/s)

Fig. 18 Power change rate of multiple scenarios($v=9$ m/s)

如图18所示,在Case2风速提高至9 m/s的条件下,模糊控制算法参与调频场景下功率变化幅值相对6 m/s工况增大,约为0.6 MW,产生负荷波动后约5 s时间频率波动恢复稳定,远快于仅火电机组调频的恢复稳定周期(约为8 s),也验证了模糊控制算法在较高风速条件下的仿真有效性;此外,系统仿真波形频率变化曲线差异较小、且恢复稳定速度较快,且同时可以观察到在引入储能系统参与模糊控制调频后约1 s内频率变化恢复稳定,且功率波动幅值最小(约0.3 MW)。

为了更加直观的体现不同风速条件下的调频性能差异,将所得输出波形整合,结果见图19、20。

由图19、20可知,在传统火电配合风电机组固定K值调频条件下,系统功率、频率曲线基本一致,受风速影响较小;同时不难发现,利用模糊控制策略,不同风速下的系统功率、频率变化曲线存在差异性,风速越大,系统功率变化数值也越大,风电出力增加,系统整体频率变化恢复稳定时间稍微增

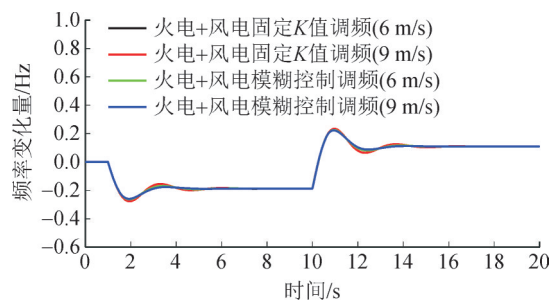


图19 不同风速条件下频率变化率对比曲线

Fig. 19 Comparison curve of frequency change rate under different wind speed conditions

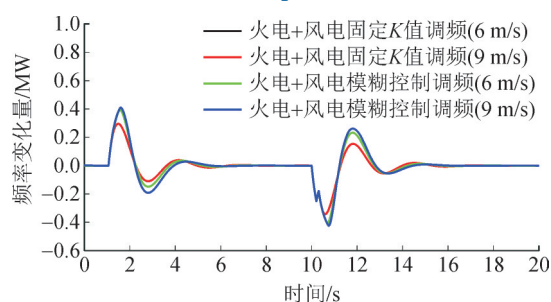


图20 不同风速条件下功率变化率对比曲线

Fig. 20 Comparison curve of power change rate under different wind speed conditions

加,即风速大小的差异在模糊控制参与调频过程中得到了具体体现。

为更加全面考虑传统火电机组、风电机组与电池储能系统参与联合一次调频过程中的影响因素,在保持较高风速为9 m/s不变的状况下降低锂电池储能系统初始荷电状态SOC为20%,并在前述模糊控制基础之上利用锂电池储能系统的下垂控制特性,对比得到频率、功率曲线变化,同时分析锂电池储能系统参与一次调频的电流变化曲线,完善相关理论分析。

Case3:降低锂电池储能系统荷电状态SOC为20%,对比分析在一次调频过程中频率、功率、电流输出波形的差异性见图21、22。

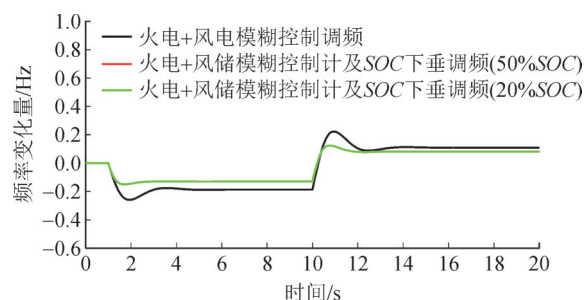


图21 不同荷电状态下垂调频控制频率变化率对比曲线

Fig. 21 Comparison curve of frequency change rate for droop frequency regulation control under different states of charge

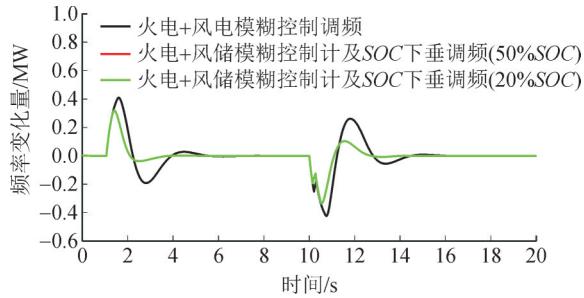


图22 不同荷电状态下垂调频控制功率变化率对比曲线

Fig. 22 Comparison curve of frequency change rate for droop power regulation control under different states of charge

增加设定电池储能系统初始较低荷电状态SOC为20%,由图20可知,火电与风电模糊控制调频在负荷波动后约2.5~3.0 s频率恢复稳定,且首次频率波动幅值约为0.3 Hz,二次负荷波动频率变化幅值约为0.4 Hz;而锂电池储能系统参与出力之后,频率稳定周期约为1 s,首次频率波动幅值约为0.2 Hz,二次负荷波动频率变化幅值约为0.3 Hz;同样由图21可知,锂电池储能系统参与一次调频后,其功率波动恢复稳定周期缩短约3 s,其首次波动幅值减小约0.1 MW,二次波动幅值减小约0.4 MW,大幅度降低了一次调频过程中的功率损耗。但值得注意的是,不同荷电状态(20%SOC、50%SOC)的锂电池储能系统参与调频效果相同,其功率、频率变化曲线基本一致,即出力大小相同,因此,对其中的电流变化波形进行测算,见图23。

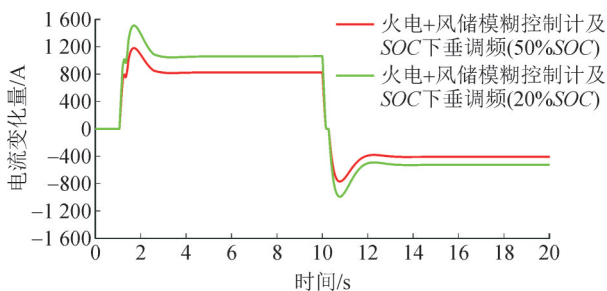


图23 不同SOC状态下垂调频控制电池电流变化量曲线对比

Fig. 23 Comparison of the current variation curve of the droop frequency regulation control battery in different SOC states

由图23所示电流变化曲线可知,较高荷电状态(50%SOC)下其电流波动幅值较小,且首次波动恢复状态稳定(放电电流约为800 A)后远小于较低荷电状态(20%SOC)电流数值(放电电流约为1 000 A);同样在负荷二次波动($t=10$ s)后,较高荷电状态条件下的电流变化幅值较小,但恢复稳定时间基本相同(约为2.5 s)。即在较低荷电状态下的储能系统依旧能

够维持系统频率稳定。综上可得:在考虑电池储能系统下垂控制的情况下,计及电池储能系统SOC状态下垂的模糊控制调频效果远优于火电、风电联合模糊控制调频,频率、功率波动更少;储能系统SOC差异对一次调频过程中的频率与功率变化没有造成显著影响,但在电池储能系统电流变化曲线上存在明显差异,输出波形符合客观事实规律,验证了所提策略的准确性。

3.3 小结

上述仿真结果表明:

1)固定荷电状态(50%),不同风速大小(6、9 m/s)场景下风电机组模糊控制调频效果均优于固定K值调频,其功率变化、频率波动时间均得到有效缩短,相对仅火电机组参与一次调频,能量损失得到较大程度减小。

2)较高风速(9 m/s)工况条件下,风电机组出力增加,火电风电联合控制调频过程中系统整体频率恢复稳定时间基本相同,但功率波动变化幅值相较于较低风速(6 m/s)工况有所增加,即风速大小对风电机组出力大小存在影响,也验证了应用模糊控制算法所搭建模型的有效性。

3)设定锂电池储能系统参与一次调频过程后,对风速大小设定进行改动,系统频率恢复稳定时间得到大幅度缩短(约1 s以上),控制在周期1 s以内,且频率波动幅值也得到了限制(减小约0.2 Hz),仿真输出波形验证了计及风速的风储系统联合火电机组一次调频控制策略的正确性。

4)改变电池储能系统的初始荷电状态,较低荷电状态(20%SOC)下的一次调频效果与一般荷电状态(50%SOC)基本一致,但充放电电流大小存在差异,即对锂电池储能系统的安全运行产生影响,在今后的研究中,应侧重于对电池储能系统的荷电状态及充放电倍率的关系进行进一步研究。

4 结语

文中首先分析并研究了负荷扰动情况下风储系统联合传统火电机组参与电力系统一次调频数学模型,应用模糊逻辑的决策性功能将风速、频率微增量等参数输出转化为 K_d 、 K_f 数值,通过三维图对比分析相关参数的影响。然后通过MATLAB/Simulink仿真平台搭建风储系统联合传统火电机组调频仿真模型,提出基于该系统的多工况调频控制策略,研究并分析了不同风速(6、9 m/s)条件下风储系统联合传统火电机组参与电网一次调频4种工作

场景的频率、功率变化输出波形,比较结果显示:风速大小对不含储能系统输出频率、功率变化具有较大影响,较高风速(9 m/s)相对较低风速(6 m/s)系统频率恢复稳定周期缩短约2.5 s;配置锂电池储能系统后,较高风速(9 m/s)相对较低风速(6 m/s)系统频率恢复稳定周期缩短约1 s;综上,较高风速条件下能够更快时间实现系统频率的快速稳定调节,验证了仿真模型的有效性与正确性。此外,在今后的研究中,充放电倍率对储能系统荷电状态造成的影响值得进行进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 屈 星,李欣然,盛义发,等.面向广义负荷的电池储能系统等效建模研究[J].电网技术,2020,44(3):926-933.
Qu Xing, Li Xinran, Sheng Yifa, et al. Research on equivalent modeling of battery energy storage system for load modeling[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 926-933.
- [2] 默天啸,刘 俊,巨 胜,等.电池储能系统在电网主动支撑中的应用研究综述[J].电力系统保护与控制,2026,54(2):174-187.
Mo Tianxiao, Liu Jun, Ju Sheng, et al. Review on the applications of battery energy storage systems in active grid support[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(2): 174-187.
- [3] 谭福成,林云志,张国政,等.基于多层动态回路模块的电池储能系统多时间尺度仿真方法[J].智慧电力,2026,54(4):95-102.
Tan Fucheng, Lin Yunzhi, Zhang Guozheng, et al. A multi-time scale simulation method for battery energy storage systems based on multi-layer dynamic circuit modules[J]. Smart Power, 2026, 54(4): 95-102.
- [4] 黄际元,李欣然,曹一家,等.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,2015,39(18):20-24.
Huang Jiyuan, Li Xinran, Cao Yijia, et al. Battery energy storage power supply simulation model for power grid frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 20-24.
- [5] 窦真兰,张春雁,杨海涛,等.模块化多电平电池储能系统功率控制与均衡策略研究[J].电网与清洁能源,2024,40(3):155-162.
Dou Zhenlan, Zhang Chunyan, Yang Haitao, et al. Research on the power control and equalization strategy of the modular multilevel battery energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 155-162.
- [6] 刘 伟,夏敏学,梁晨鹏.高压直挂大容量电池储能系统实时仿真及控制研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(14):154-166.
Liu Wei, Xia Minxue, Liang Chenpeng. Real-time simulation and control of a large capacity battery energy storage system directly connecting to a high-voltage grid without a transformer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 154-166.
- [7] 游 力,熊亮勇,李震宇,等.基于构网型储能的独立电网同期并网技术研究及实证[J].电力系统保护与控制,2026,54(6):148-159.
You Li, Xiong Liangli, Li Zhenyu, et al. Research and demonstration of synchronization and grid-connection technology for islanded grids based on grid-forming energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(6): 148-159.
- [8] 李建林,李雅欣,周喜超.电网侧储能技术研究综述[J].电力建设,2020,41(6):77-84.
Li Jianlin, Li Yaxin, Zhou Xichao. Summary of research on grid-side energy storage technology[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 77-84.
- [9] He Hongwen, Rui Xiong, Fan Jinxin. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach[J]. Energies, 2011, 4(4): 582-598.
- [10] 李军徽,侯 涛,严干贵,等.计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J].中国电机工程学报,2021,41(23):8020-8033.
Li Junhui, Hou Tao, Yan Gangui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8020-8033.
- [11] 梁新成,张 勉,黄国钧.基于BMS的锂离子电池建模方法综述[J].储能科学与技术,2020,9(6):1933-1939.
Liang Xincheng, Zhang Mian, Huang Guojun. Review on lithium-ion battery modeling methods based on BMS[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1933-1939.
- [12] 李建林,屈树慷,黄孟阳,等.锂离子电池建模现状研究综述[J].热力发电,2021,50(7):1-7.
Li Jianlin, Qu Shukang, Huang Mengyang, et al. A review of current research on lithium-ion battery modeling[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 1-7.
- [13] 郑 旭,郭 汾.动力电池模型综述[J].电源技术,2019,43(3):521-524.
Zheng Xu, Guo Fen. Overview of power battery model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2019, 43(3): 521-524.
- [14] 刘 巨,姚 伟,文劲宇,等.一种基于储能技术的风电场虚拟惯量补偿策略[J].中国电机工程学报,2015,35(7):1596-1605.
Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, et al. A wind farm virtual inertia compensation strategy based on energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1596-1605.
- [15] Liu Hui, Hu Zechun, Song Yonghua, et al. Vehicle-to-grid control for supplementary frequency regulation considering charging demands[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3110-3119.
- [16] 李建杰.电动汽车动力锂电池建模、仿真及均衡控制研究[D].郑州:郑州大学,2020:18-43.
Li Jianjie. Research on modeling, simulation and equalization control of power lithium battery for electric vehicles[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 18-43.
- [17] 邵丽华,章竹耀,张春龙,等.储能电池荷电状态与平抑风电出力波动协调运行策略[J].电力建设,2017,38(1):84-88.
Shao Lihua, Zhang Zhuyao, Zhang Chunlong, et al. Coordinated operation strategy of storage battery SOC and smoothing wind power fluctuation[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 84-88.
- [18] 贾天下,陈 磊,闵 勇,等.快速响应储能参与一次调频的控制策略[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(5):429-436.
Jia Tianxia, Chen Lei, Min Yong, et al. Control strategy for primary frequency regulation with the participation of a quick response energy storage[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(5): 429-436.
- [19] Datta M, Senjyu T, Yona A, et al. A coordinated control method for leveling PV output power fluctuations of PV-diesel hybrid systems connected to isolated power utility[J]. IEEE Transactions

- on Energy Conversion, 2009, 24(1): 153-162.
- [20] 孙冰莹. 储能辅助火电机组 AGC 调频运行方法及容量配置研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 22-36.
- Sun Bingying. Research on AGC frequency modulation operation method and capacity configuration of energy storage auxiliary thermal power unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 22-36.
- [21] 王伟亮, 刘会巧, 张天宇, 等. 基于多任务集成学习的储能电池剩余使用寿命预测[J]. 电力建设, 2024, 45(11): 25-33.
- Wang Weiliang, Liu Huiqiao, Zhang Tianyu, et al. Multi-task ensemble learning-based prediction of remaining useful life of energy-storage batteries[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11): 25-33.
- [22] 丁勇, 华新强, 蒋顺平, 等. 大容量电池储能系统一次调频控制策略[J]. 电力电子技术, 2020, 54(11): 38-41.
- Ding Yong, Hua Xinqiang, Jiang Shunping, et al. A primary frequency regulation strategy of large-capacity battery energy storage system[J]. Power Electronics, 2020, 54(11): 38-41.
- [23] 颜湘武, 王德胜, 魏小雪, 等. 风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5911-5922.
- Yan Xiangwu, Wang Desheng, Wei Xiaoxue, et al. Research on the wind power-storage joint control based on fault ride-through and frequency regulation of wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5911-5922.
- [24] 李林高. 电池储能系统辅助火电机组参与电网调频的控制策略优化[D]. 太原: 山西大学, 2020: 31-47.
- Li Lingao. Control strategy optimization of battery energy storage system to assist thermal power units to participate in grid frequency modulation[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020: 31-47.
- [25] 于雷. 电池储能系统参与电网调频的控制策略研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- Yu Lei. Research on control strategy of battery energy storage system participating in grid frequency regulation[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
- [26] Boyle J, Littler T, Foley A. Battery energy storage system state-of-charge management to ensure availability of frequency regulating services from wind farms[J]. Renewable Energy, 2020(160): 1119-1135.
- [27] Kazari H, Oraee H, Pal B C. Assessing the effect of wind farm layout on energy storage requirement for power fluctuation mitigation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 558-568.
- [28] 况理, 文云峰, 陆艺丹, 等. 含虚拟同步机的微电网频率稳定约束优化调度模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 71-82.
- Kuang Li, Wen Yunfeng, Lu Yidan, et al. Frequency stability constrained optimal dispatch model of microgrid with virtual synchronous machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 71-82.
- [29] Zhang Shengqi, 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.
- 李明(1990—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为新能源及储能并网运行与检测技术研究(通信作者)(E-mail: hanfenliming07@163.com)。
- 亚夏尔·吐尔洪(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为可调负荷控制及负荷数据通信技术(E-mail: 532130292@qq.com)。
- 郑云平(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为可调负荷控制及储能优化控制工作(E-mail: zyp_mess@163.com)。
- (上接第 167 页)
- method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 49-53.
- [25] 李志兵. GIS 隔离开关操作重复放电模型研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2014.
- Li Zhibing. Research on repeated discharge model of GIS disconnecting switching operation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2014.
- [26] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266.
- Liu Fenglian, Xia Rong, Li Wenjie, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 259-266.
- [27] 金祖山, 吴明祥, 李思南, 等. 浙江电网电力电缆故障的原因分析和对策[J]. 浙江电力, 2014, 33(5): 6-10.
- Jin Zushan, Wu Mingxiang, Li Sinan, et al. Cause analysis and countermeasures of power cable faults in Zhejiang power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(5): 6-10.
- [28] 廖雁群, 惠宝军, 夏荣, 等. 110 kV 电缆中间接头及本体典型缺陷局部放电特征分析[J]. 绝缘材料, 2014, 47(5): 60-67.
- Liao Yanqun, Hui Baojun, Xia Rong, et al. Partial discharge characteristics analysis of typical defects for 110 kV cable and joint[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 60-67.
- [29] 顾金, 王俏华, 尹毅, 等. 高压直流 XLPE 电力电缆预制式接头的研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3159-3163.
- Gu Jin, Wang Qiaohua, Yin Yi, et al. Design of prefabricated joints for HVDC XLPE power cables[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3159-3163.
- [30] 卓金玉. 电力电缆终端结构中的应力锥电场数值分析和模拟实验研究[J]. 电工技术学报, 2000, 15(2): 15-19.
- Zhuo Jinyu. Experimental simulation and numeric analysis of the electric field in the stress-cone of power cable terminals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(2): 15-19.
- [31] 马自伟, 贾江波, 查玮, 等. 10 kV XLPE 电缆终端电场分布与调整[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 304-306.
- Ma Ziwei, Jia Jiangbo, Zha Wei, et al. Electrical field distribution and adjustment in 10 kV XLPE cable terminals[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 304-306.
- [32] Ghassemi F, Dennis S, Ainsley A, et al. 275 kV cable discharge field measurement and analysis of SVLs chain failure using ATP[J]. Electric Power Systems Research, 2018(161): 95-102.
- 王瀚锋(1992—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为高压电缆绝缘状态评估(通信作者)(E-mail: 13991112028@163.com)。