

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231513

风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制

井浩然¹, 施通勤², 徐秋实², 姚伟¹, 赵红生², 莫石²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;

2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 针对单个变速抽蓄调频容量不足和风电场调频后转子转速恢复容易引发频率二次跌落的问题, 提出一种风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制策略。首先, 当电网发生频率事件时, 该策略根据风电场风速和区域内多分布式变速抽水蓄能可调节容量对电网频率提供支撑。然后, 针对风电调频后转子转速恢复过程容易引发系统频率二次跌落的问题, 在风电转子转速恢复时通过多分布式变速抽蓄提供功率支撑来缓解系统频率二次跌落。最后, 以含风电场与分布式变速抽蓄的四机两区域系统为例, 通过 Matlab/Simulink 仿真验证了所提控制策略相比风电场和多分布式变速抽水蓄能独立调频对于系统具有更好的调频效果。

关键词: 抽水蓄能; 双馈变速抽水蓄能; 分布式; 风电; 协同控制; 调频

Coordinated frequency modulation control of a wind farm and multi-distributed variable speed pumped storage

JING Haoran¹, SHI Tongqin², XU Qiushi², YAO Wei¹, ZHAO Hongsheng², MO Shi²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Economic & Technology Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient frequency modulation capacity of single variable speed pumping and storage and the secondary frequency drop caused by rotor speed recovery after frequency modulation of wind farm, a cooperative frequency modulation control strategy of wind farm and multi-distributed variable speed pumped storage is proposed. First, when frequency events occur in the power grid, the strategy provides support for the frequency of the power grid according to the wind speed of the wind farm and the adjustable capacity of multi-distributed variable speed pumped storage in the region. Then, in view of the problem of secondary frequency drop caused by rotor speed recovery after wind power frequency modulation, multi-distributed variable speed pumping provides power support to alleviate the secondary frequency drop during rotor speed recovery. Finally, taking a four-machine two-zone system with wind farm and distributed variable speed pumped storage as an example, the proposed control strategy is verified through Matlab/Simulink simulation to have better frequency modulation effect than wind farm and multi-distributed variable speed pumped storage independent frequency modulation.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202222010A-1-1-ZN).

Key words: pumped storage; doubly-fed variable speed pumped storage; distributed; wind power; cooperative control; frequency modulation

0 引言

近年来, 以风电、光伏为代表的新能源在全球

装机容量占比不断提升, 传统同步机容量占比不断下降, 电力系统等效惯量相对减小, 系统频率稳定性面临严峻挑战^[1-3]。传统火电与水电机组已难以满足电力系统调频需求, 双馈变速抽水蓄能(doubly fed variable speed pumped storage, DFVSPS)以其相比定速抽水蓄能更快速的功率调节速度和更宽的功

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202222010A-1-1-ZN)

率调节范围可以在电网调频过程中发挥重要作用。因此,利用 DFVSPS 促进新能源消纳成为国内外学者关注的热点^[4]。

当前针对 DFVSPS 调频的研究主要集中在变速抽蓄本身的调频特性和运行控制上,文献[5]介绍了 DFVSPS 在发电工况下一次调频特性,通过在转速调节器中附加功率前馈控制,加快了导叶的开启速度,缩短了功率响应时间;文献[6]采用傅立叶分析得到了 DFVSPS 出力的频谱特性,并据此分析了 DFVSPS 机组对电网频率的控制作用;文献[7]提出了一种带比例-微分(proportional-differential, PD)环节的 DFVSPS 改进虚拟惯量控制策略,通过用系统频率偏差值的微分项代替频率的微分项,消除了频率的稳态静差,但 PD 系数无法根据抽蓄实时可用容量自适应调整;文献[8]研究了 DFVSPS 通过平抑风电出力波动减小系统频率偏差的控制策略;文献[9]提出了一种 DFVSPS 通过改变转子动能控制与导叶开度控制系数以实现协调调频控制的方法。

上述方法均聚焦于单台变速抽蓄本身的控制策略。而由于地理条件的限制,大型抽蓄电站选址越来越困难,中小型抽水蓄能以其选址布置灵活、可以接近负荷中心,生态环境友好,建设周期较短受到越来越多的青睐^[10-12]。在同一区域内经常分布有多个中小型抽水蓄能,因此分布式抽蓄成为新的发展趋势^[13]。尤其是分布式变速抽蓄以其反应迅速、调节灵活将成为调频的优质手段。因此,研究多分布式变速抽蓄间的协调控制和分布式变速抽蓄与新能源场站如风电场之间的协同控制是有必要的^[14-17]。

当前储能与风电场的调频控制主要有两种方式^[18]:一种是储能与风机均参与调频,由储能对风机调频性能进行优化;一种是场站储能对整个风电场进行统一功率支撑,风机不再参与调频,但此种方式下调频容量不如第一种。文献[19]提出了一种基于风机旋转备用加直流电容器的风储联合控制策略,能够提高风电调频性能;文献[20]基于模型预测控制提出了一种风储联合系统参与电网一次调频,实现了风储功率的经济分配;文献[21]基于模型预测控制和双层模糊控制提高了储能跟踪风电出力的能力。但上述控制策略中储能均需额外投资建设,甚至需要对风机进行改造。

综上所述,本文提出一种风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频的控制策略,该控制策略分为两阶段,第一阶段当电网发生频率事件时,根据风电风速和区域内多分布式变速抽蓄可用容量对电网

提供频率支撑,充分利用风电参与调频能力并提高分布式变速抽蓄参与调频容量;第二阶段针对风电调频后转子转速恢复过程容易引发系统频率二次跌落的问题,在风电转子转速恢复时多分布式变速抽蓄提供功率支撑,有效缓解系统频率二次跌落,风电场无需额外投资即可优化调频性能;最后,通过 Matlab/Simulink 仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 考虑变速抽蓄调频能力的多分布式协调控制策略

1.1 基于一致性算法的分布式控制

多分布式变速抽蓄各场站间的通信拓扑可以用有向图 $G \triangleq (V, E)$ 来表示,其中 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 为有限非空节点集, N 表示有向图中的节点数,即变速抽蓄场站数; $E \subseteq V \times V$ 为节点序对的集合,即边集,边集即节点间数据交换的通信链路。如果节点 j 可以从节点 i 中获取信息,则 $(i, j) \in E$ 。有向图的邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 表征有向图的通信权重,如果 $(i, j) \in E$, 则 $a_{ij} > 0$, 否则 $a_{ij} = 0$ 。本文不考虑通信权重,对所有 $(i, j) \in E$, 取 $a_{ij} = 1$ 。 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ 为有向图的入度矩阵,其元素 d_i 表征节点 i 总的通信权重,即 $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$, 在本文中, d_i 为与节点 i 通信的所有节点数。通信网络的拓扑可以用拉普拉斯矩阵 $L = [l_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 表示,其定义为

$$L = D - A \Rightarrow \begin{cases} l_{ij} = -a_{ij}, i \neq j \\ l_{ii} = \sum_{j=1}^N a_{ij}, i = j \end{cases} \quad (1)$$

对于节点的状态信息量 x_i , 一种一阶平均一致性算法^[22]可表示为

$$\dot{x}_i = -\sum_{j=1}^N a_{ij}(x_i - x_j), i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

只要通信网络的拓扑 G 包含一条有向生成树,即存在一个根节点,与其他所有节点至少有一条有向路径,则式(2)在 $t \rightarrow \infty$ 时,满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_i(t) - x_j(t)| = 0$ 。

本文设置分布式变速抽蓄场站间的通信拓扑为环形,如图1所示。在此种通信拓扑下,若某两个变速抽蓄场站间通信发生故障,或某个变速抽蓄场站因故障或水位达到限制而退出运行时,仍能保证通信网络中有一簇有向生成树,可靠性高。

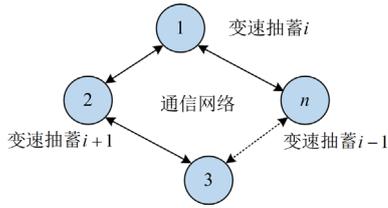


图 1 分布式变速抽水蓄能通信拓扑图

Fig. 1 Distributed variable speed pumped storage communication topology

1.2 有主导的多分布式变速抽蓄一致性协调控制

变速抽蓄发出的有功功率一般受两方面指令控制：调度指令、附加控制指令。调度指令一般由调度中心根据电网负荷水平发出，发出或吸收的有功用于削峰填谷或新能源消纳^[23]。附加控制指令一般由本地控制器根据系统频率等测量量经过计算得到。调度指令优先级一般大于附加控制指令，因此抽蓄能够用于调频的附加控制指令值一般不超过变速抽蓄正常运行范围内有功限值与有功调度值的差值。在本文中，认为变速抽蓄在水轮机工况下功率为正，在水泵工况下功率为负。变速抽蓄附加调频控制能够发出或吸收的最大有功功率 $P_{f \max}$ 为

$$P_{f \max} = \begin{cases} P_{S \max} - P_{\text{调度}}, & \text{水轮机工况向上调频} \\ P_{\text{调度}} - P_{S \min}, & \text{水轮机工况向下调频} \\ P_{\text{调度}} - P_{P \min}, & \text{水泵工况向上调频} \\ P_{P \max} - P_{\text{调度}}, & \text{水泵工况向下调频} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $P_{S \max}$ 、 $P_{S \min}$ 分别为变速抽蓄在水轮机工况下正常运行时有功功率最大、最小值； $P_{\text{调度}}$ 为变速抽蓄调度指令值； $P_{P \max}$ 、 $P_{P \min}$ 分别为变速抽蓄在水泵工况下正常运行时有功功率最大、最小值。

由于不同变速抽蓄的容量、调度指令与蓄水状态(state of water storage, SWS)存在差别，因此控制目标应尽可能实现不同变速抽蓄场站的有功功率标幺值与蓄水状态一致，以满足变速抽蓄场站间功率分担的作用，并避免某台变速抽蓄提前达到蓄水状态限制而停机，以最大限度提供可用容量。运行此控制策略一定时间后有功功率或蓄水状态标幺值趋于一致。但蓄水状态一致性只有在抽蓄都为同一工况时才能加入，否则无意义。

因此在控制中加入可以对变速抽蓄的有功功率与蓄水状态标幺值进行衡量的一致性因子。设置有功功率标幺值一致性因子 x_n 为

$$x_n = \frac{\bar{P}_n - P_n}{P_n - \underline{P}_n}, \frac{P_n}{\bar{P}_n} \leq P_n \leq \frac{P_n}{\underline{P}_n} \quad (4)$$

式中： \bar{P}_n 、 \underline{P}_n 分别为第 n 个变速抽水蓄能场站正常运行时有功功率标幺值的上、下限值； P_n 为第 n 个变速抽水蓄能场站当前有功功率的标幺值。在水轮机工况下有功功率标幺值上限为正最大值，下限为正最小值；在水泵工况下由于功率为负，因此上限的绝对值为最小值，下限的绝对值为最大值。

蓄水状态标幺值一致性因子 y_n 为

$$y_n = \frac{\overline{S_{WSn}} - S_{WSn}}{S_{WSn} - \underline{S_{WSn}}}, \frac{S_{WSn}}{\overline{S_{WSn}}} \leq S_{WSn} \leq \frac{S_{WSn}}{\underline{S_{WSn}}} \quad (5)$$

式中： $\overline{S_{WSn}}$ 、 $\underline{S_{WSn}}$ 分别为第 n 个变速抽水蓄能场站正常运行时蓄水状态标幺值的上、下限； S_{WSn} 为第 n 个变速抽水蓄能场站当前蓄水状态的标幺值。

分布式变速抽蓄机组的一致性协调控制策略如图 2 所示，分为物理层、通信层、控制层。物理层包含水泵水轮机和变流器等硬件部分。通信层实现分布式变速抽蓄间的通信。控制层包括变速抽蓄控制和风机控制。变速抽蓄控制用于跟踪有功调度指令值，附加调频控制策略，根据通信获得的信号产生有功功率和 SWS 标幺值一致性控制信号；风机控制产生风机调频信号。分布式变速抽蓄一般选择一台机组作为主导机组，附加综合惯量控制产生控制信号，其余机组通过通信相互连接，跟随主导机组信号改变功率输出。因为变速抽蓄在水轮机工况下采用功率优先控制策略，在水泵工况下采用转速优先控制策略，因此变速抽蓄控制产生的控制信号为有功功率或转速。

其中根据有功功率与 SWS 标幺值一致性因子计算得到的附加控制信号 P_f 为

$$P_f = K_{pn1}[x_n(t) - x_{n-1}(t)] + K_{in1}[x_n(t) - x_{n-1}(t)] + K_{pn2}[x_n(t) - x_{n+1}(t)] + K_{in2}[x_n(t) - x_{n+1}(t)] + K_{pn3}[y_n(t) - y_{n-1}(t)] + K_{in3}[y_n(t) - y_{n-1}(t)] + K_{pn4}[y_n(t) - y_{n+1}(t)] + K_{in4}[y_n(t) - y_{n+1}(t)] \quad (6)$$

式中： K_{pn1} 、 K_{in1} 、 K_{pn2} 、 K_{in2} 均为有功一致性 PI 控制参数； $x_n(t)$ 、 $x_{n-1}(t)$ 、 $x_{n+1}(t)$ 分别为第 n 个变速抽水蓄能场站及其通信拓扑相邻的两个变速抽水蓄能场站在 t 时刻的有功一致性因子； K_{pn3} 、 K_{in3} 、 K_{pn4} 、 K_{in4} 均为蓄水状态一致性 PI 控制参数； $y_n(t)$ 、 $y_{n-1}(t)$ 、 $y_{n+1}(t)$ 分别为第 n 个变速抽水蓄能场站及其通信链路相邻的两个变速抽水蓄能场站在 t 时刻的蓄水状态一致性因子。

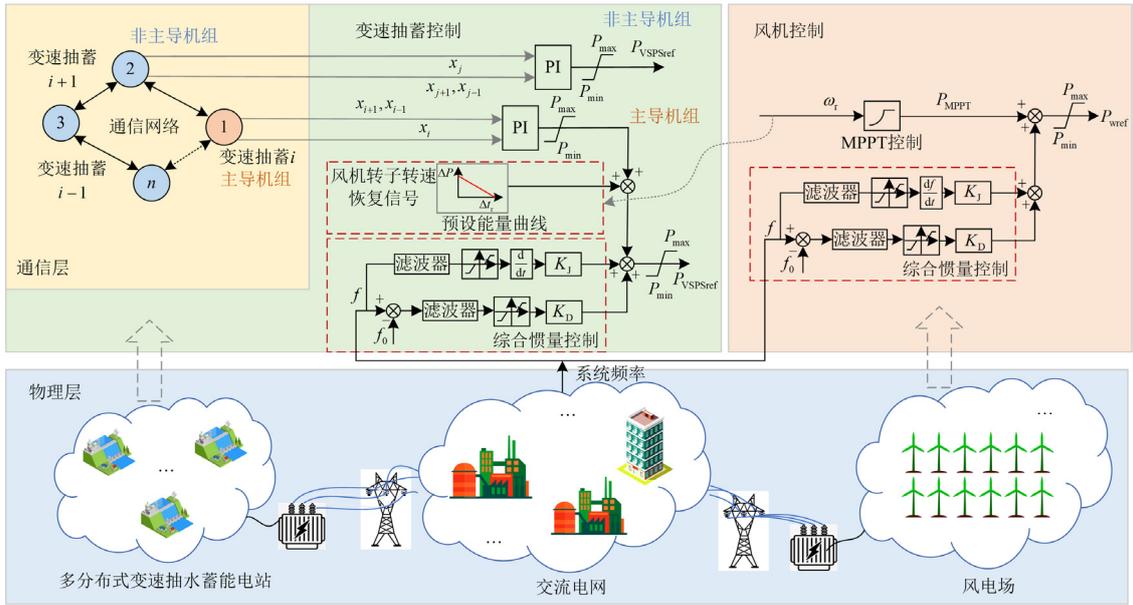


图 2 分布式变速抽水机组的一致性协调控制策略

Fig. 2 Coherent and coordinated control strategy of distributed variable speed pumping and storage units

2 风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制

2.1 风电场调频控制策略

双馈风机(doubly fed induction generator, DFIG)作为一种典型的变速恒频机组,以其技术成熟、成本合理得到广泛应用^[24-26],本文主要以 DFIG 作为研究对象。DFIG 的转子转速与系统频率解耦,无法主动响应系统频率变化,因此需要附加额外的控制策略使其具备参与电网调频的能力^[27]。双馈风机参与频率调节的控制策略主要包括:综合惯量控制、桨距角控制、超速控制等方法^[28]。由于桨距角控制针对机械结构,响应较慢且影响风机寿命;超速控制不适用于高风速,因此本文主要采用综合惯量控制,风电机组有功参考值 P_{wref} 为

$$P_{wref} = -K_{Jw} \frac{df}{dt} - K_{Dw} \Delta f + P_{MPPT} \quad (7)$$

$$\Delta f = f - f_0 \quad (8)$$

式中: K_{Jw} 为虚拟惯性系数,用于模拟同步机的惯量; df/dt 为系统频率变化率; K_{Dw} 为下垂系数,用于模拟调速器的下垂特性; Δf 为当前频率相比基准频率偏差值; P_{MPPT} 为风机最大功率跟踪值; f 为当前频率测量值; f_0 为频率基准值。

2.2 多分布式变速抽水蓄能主导机组调频控制策略

抽水蓄能(variable speed pumped storage, VSPS)在调峰、调频和调相方面能够发挥良好作用,尤其

是变速抽水蓄能技术,其具有更宽的功率调节范围、更高的效率和更快功率响应速度。变速抽水蓄能目前主要分为双馈变速抽水蓄能和全功率变速抽水蓄能。双馈变速抽水蓄容量更大、经济性更好,因此本文主要研究对象为双馈变速抽水蓄能。

双馈变速抽水蓄与双馈风机类似,其转子转速与频率解耦。机组有功功率主要由转子换流器控制。在发电工况下,转子换流器优先控制有功功率,当机组的有功功率参考值发生变化时,换流器迅速响应,控制机组的有功功率快速跟踪参考值;在抽水工况下,机组吸收的有功功率由转速决定,转子换流器优先控制转速,当机组有功功率参考值发生变化,首先根据水泵水轮机综合特性曲线得到最优转速,换流器迅速响应,控制机组转速达到最优转速,从而调节机组有功功率。

变速抽水蓄同样采用综合惯量控制,在有功功率指令值之外附加有功控制指令 ΔP_v , 如式(9)所示。

$$\Delta P_v = -K_{Jv} \frac{df}{dt} - K_{Dv} \Delta f \quad (9)$$

$$\Delta f = f - f_0 \quad (10)$$

式中: K_{Jv} 为虚拟惯性系数,用于模拟同步机的惯量; K_{Dv} 为下垂系数,用于模拟调速器的下垂特性。

2.3 风电与变速抽水蓄协同调频控制策略

在频率调节过程中,如果仅依靠风机进行调频,则风机在风速较高或较低的情况下调频能力受限。且风电机组的综合惯量控制是通过控制转子转速来

释放或者吸收风电机的富裕动能, 从而使其快速响应系统频率变化。但在转速恢复过程中同样也会吸收或释放这部分动能, 所以风机的综合惯量控制在频率恢复过程中可能会造成频率的二次跌落。

同理, 如果仅依靠变速抽蓄进行调频, 其调频容量受到有功调度指令值限制, 只能发挥正常运行范围内有功调度指令值之外的可用容量进行调频。

因此, 风电与变速抽蓄共同参与调频, 既可以充分发挥风机与变速抽蓄的调频能力, 也可以进行优势互补, 同时变速抽蓄在风电转速恢复期间也可以提供有功支撑, 减小频率二次跌落。

关于水电机组参与调频, 标准 DLT 2194—2020《水力发电机组一次调频技术要求及试验导则》规定: “一次调频死区设置应不大于 ± 0.05 Hz。” 根据标准规定, 制定风电与变速抽蓄联合调频控制流程如图 3 所示。

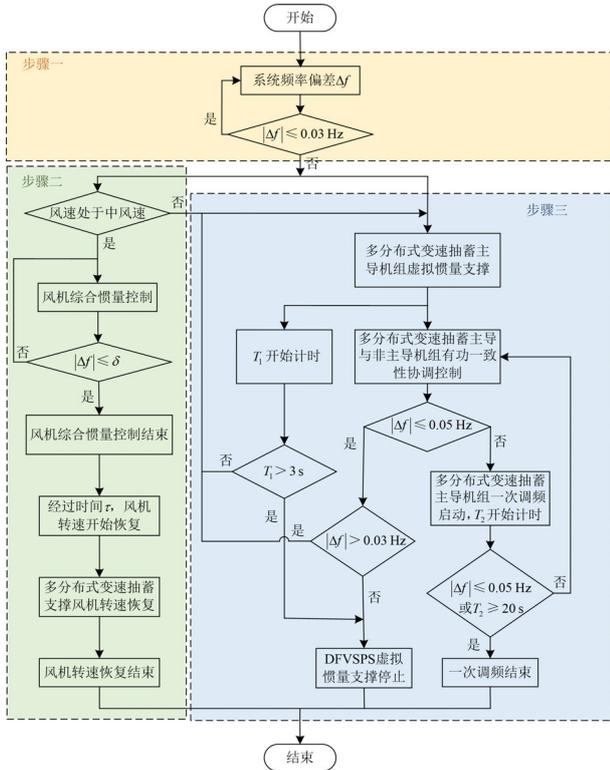


图 3 风电与多分布式变速抽蓄协同调频流程图

Fig. 3 Flow chart of frequency modulation of wind power and variable speed pumping and storage

步骤一: 首先测量系统频率偏差, 若频率偏差小于 0.03 Hz, 则进入下一测量周期, 否则, 进入步骤二。

步骤二: 测量风速大小, 若风速较高, 受输出功率限制, DFIG 无法输出调频要求的额外功率,

依靠转子动能难以完成惯性响应阶段的任务; 若风速较低, 释放转子动能容易致使 DFIG 脱网, 造成风电场出力进一步下降。一般定义风速区间为: 低风速 (≤ 11.7 m/s)、中风速 (11.7~13 m/s) 和高风速 (> 13 m/s)。若风机处于中风速, 则风电进行综合惯量控制, 当频率偏移小于设定值 δ 时, 说明频率已达到标准, 则风机综合惯量控制结束。调频结束 τ s 时间后, 风机进入转子转速恢复阶段, 此时变速抽蓄发出或吸收一定有功功率, 以减小频率二次跌落, 直至风机转速恢复结束。若风机不处于中风速, 则风电难以进行调频控制, 需要由变速抽蓄进行调频, 进入步骤三。

步骤三: 变速抽蓄发出或吸收一定有功功率, 进行虚拟惯量支撑, 若频率偏差超过 0.05 Hz, 则变速抽蓄进入一次调频, 并开始计时, 若计时大于 3 s, 或频率偏差小于 0.03 Hz, 则退出虚拟惯量支撑。在一次调频过程中, 若时间超过 20 s, 或频率偏差小于 0.05 Hz, 则退出一一次调频。

3 考虑系统频率二次跌落的风电转速恢复方法

在风电场提供频率支撑后, 将进入转速恢复阶段, 风机为回到调频前原工作点需减小出力, 若不采用合适控制方式, 此时的功率缺额可能造成严重的二次频率跌落, 因此, 本文采用预设恢复曲线控制策略。

3.1 预设转速恢复曲线的风电转速恢复方法

风机转速恢复阶段出力初值设置为频率支撑阶段末值, 并随着预设加速曲线恢复转子动能, 直到工作点回到最大功率跟踪点曲线上, 如式(11)和式(12)所示。

$$P_{s,\text{ref}} = k_0 \omega_r^2 + \Delta P_{s2}(t), t_1 \leq t \leq t_1 + \Delta t_r \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{s2}(t_1) = P_{s1}(t_1) = \Delta P_{\text{in}} + \Delta P_{\text{dr}} + (k_1 - k_0) \omega_r^2 \\ \Delta P_{s2}(t_1 + \Delta t_r) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{s,\text{ref}}$ 为转速恢复阶段的功率参考值; k_0 为 MPPT 曲线系数^[29]; ω_r 为风机转子转速; ΔP_{s2} 为预先设计好的加速曲线的值; t_1 为转速恢复阶段初始时间; Δt_r 为转速恢复时间; P_{s1} 为频率支撑阶段风机的附加功率值与过载 MPPT 曲线的过载部分功率之和; ΔP_{in} 和 ΔP_{dr} 为附加功率参考值^[30]; k_1 为过载 MPPT 曲线频率支撑阶段的稳定系数。

由文献[14]可知, 转速恢复曲线设置为图 4 情况时频率二次跌落最小。同时, 风电调频退出时刻

对频率二次跌落幅度也存在一定影响,为防止风机转速恢复过程导致二次跌落拉低系统频率最低点,并保证风机安全运行,为转速恢复留有一定时间裕度,本文采用固定退出时刻,时间设置为系统频率达到最低点后 1 s。

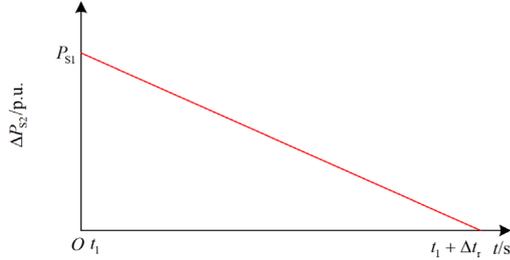


图 4 频率二次跌落最小的转子转速恢复曲线

Fig. 4 Recovery curve of rotor speed with minimum frequency secondary drop

3.2 分布式变速抽蓄缓解频率二次跌落方法

当风机启动转速恢复从系统中吸收能量导致频率二次跌落时,变速抽蓄在一定条件下增发功率或减少吸收功率,弥补这部分功率缺额。一般每台风机和整个风场转速恢复需要的能量分别如式(13)和式(14)所示。

$$\Delta E_i = H_{W_i}(\omega_{ri}^2 - \omega_{ri,\min}^2) \quad (13)$$

$$\Delta E = \sum \Delta E_i \quad (14)$$

式中: ΔE_i 为第 i 台风机恢复转速需要的能量; H_{W_i} 为第 i 台风机的转动惯量; ω_{ri} 为第 i 台风机的转速; $\omega_{ri,\min}$ 为第 i 台风机转速的最小值; ΔE 为整个风场转速恢复需要的能量。

因此,变速抽蓄应在风机转子转速开始恢复时启动,发出的有功功率若能与 ΔP_{s2} 完全一致,则代表风电产生的功率缺额被分布式变速抽蓄完全消纳,此时抑制频率二次跌落效果最好。但大部分时间分布式变速抽蓄能够用来支撑风电转速恢复的功率小于风电功率缺额,因此分布式变速抽蓄发出的有功功率最好与 ΔP_{s2} 成正比。

$$\Delta P_{r,DFVSPS} = \sum_{i=1}^n \Delta P_{r,DFVSPS_i} = k_2 \Delta P_{s2}, 0 < k_2 \leq 1 \quad (15)$$

式中: $\Delta P_{r,DFVSPS}$ 为所有分布式变速抽蓄发出的用于支撑风电转速恢复的附加有功功率; n 为分布式变速抽蓄机组台数; $\Delta P_{r,DFVSPS_i}$ 为单台变速抽蓄发出的用于支撑风电转速恢复的附加有功功率; k_2 为风电加速曲线伸缩系数,避免变速抽蓄功率超过功率限制; ΔP_{s2} 为风电加速曲线的值。

4 算例分析

本文的研究重点在于风电与分布式变速抽蓄在调频方面的协同配合,因此,仿真算例设置为在 IEEE 四机两区域系统中加入一个由 3 台 100 MW 风机聚合而成的风电场,及 3 台不同位置的变速抽蓄构成分布式控制,在 Matlab/Simulink 中构建如图 5 所示模型,同步机参数使用 IEEE 4 机 11 节点系统标准算例参数,分布式变速抽蓄机组参数如表 1 所示。其中 S_B 为额定容量, P 为变速抽蓄的有功功率调度指令值, P/S_B 为有功标么值。

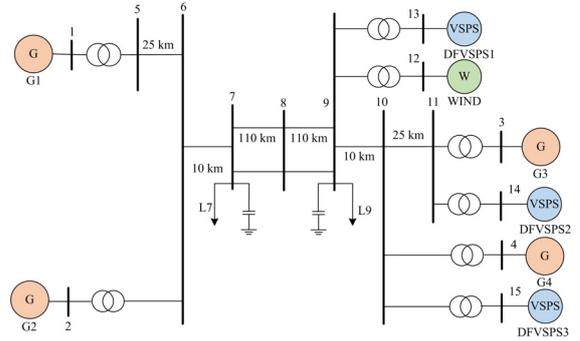


图 5 含风电场与分布式变速抽蓄的四机两区域系统

Fig. 5 Four-machine two-zone system with wind farm and distributed variable speed pumping and storage

表 1 风电与变速抽蓄机组容量与功率

Table 1 Capacity and power of wind and variable speed pumping and storage units

参数	值	参数	值
$S_{B_DFVSPS1}/MVA$	100	$P/S_{B_DFVSPS1}$	0.6
$S_{B_DFVSPS2}/MVA$	80	$P/S_{B_DFVSPS2}$	0.5
$S_{B_DFVSPS3}/MVA$	50	$P/S_{B_DFVSPS3}$	0.4
$P_{DFVSPS1_order}/MW$	60	S_{B_wind1}/MVA	100
$P_{DFVSPS2_order}/MW$	40	S_{B_wind2}/MVA	100
$P_{DFVSPS3_order}/MW$	20	S_{B_wind3}/MVA	100

4.1 分布式变速抽蓄一致性协调控制

为验证分布式变速抽蓄一致性协调控制的有效性,首先在 1 s 时加入有功功率标么值一致性控制,在 5 s 时变速抽蓄 2 号场站与 3 号场站通信断开,8 s 时 1 号场站与 3 号场站通信也断开,如图 6 所示。

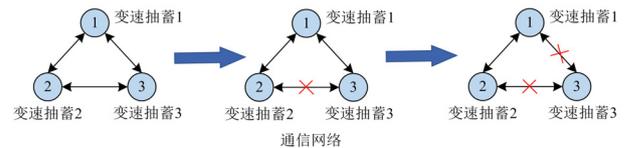
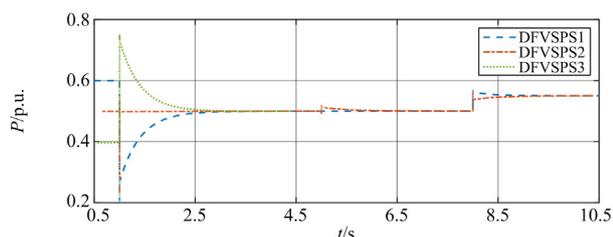


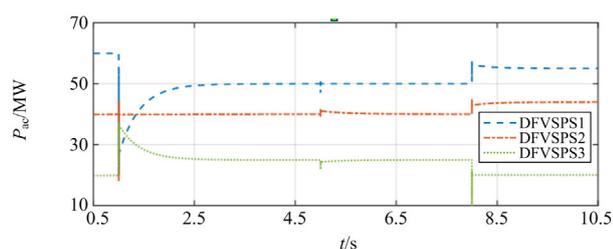
图 6 分布式变速抽蓄通信拓扑示意图

Fig. 6 Distributed variable speed pumping communication topological diagram

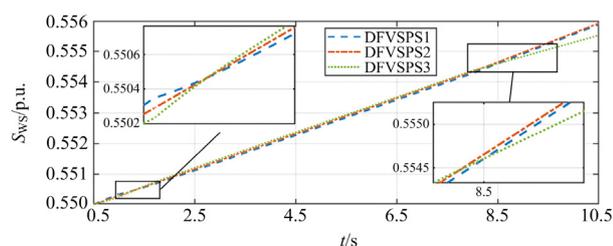
图 7 所示为分布式变速抽蓄有功功率标幺值一致性协调控制仿真结果。可以发现, 未加入有功功率标幺值一致性协调控制时分布式变速抽蓄有功功率的实际值与标幺值均不同, 在 1 s 时加入一致性协调控制后有功功率标幺值趋于一致, 但由于机组额定容量不同, 所以每台抽蓄机组的实际有功功率不同。经过一定时间的迭代, 由于有功功率标幺值一致, 蓄水状态曲线逐渐趋于平行但不收敛。在 5 s 时变速抽蓄 2、3 号通信断开, 通信连接由环式变为链式, 有功功率标幺值产生轻微波动, 但很快又趋于一致。8 s 时变速抽蓄 1、3 号通信也断开, 1、2 号变速抽蓄通信连接, 有功功率标幺值趋于一致, 3 号完全独立, 有功功率恢复 1 s 前水平, 蓄水状态 1、2 号平行, 3 号斜率变小, SWS 曲线偏离 1、2 号。由图 7 可以看出, 有功功率标幺值与一致性因子变化趋势相同, 加入有功功率标幺值一致性后蓄水状态曲线平行但不收敛, 这就会导致有抽蓄先达到蓄水状态限值, 导致停机, 使得分布式变速抽蓄整体调频容量下降。因此加入 SWS 一致性因子仿真验证其对分布式抽蓄 SWS 的协调控制效果。



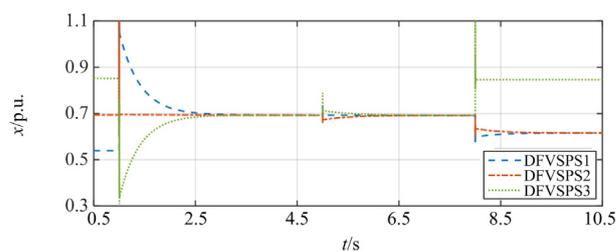
(a) 有功功率标幺值



(b) 有功功率实际值



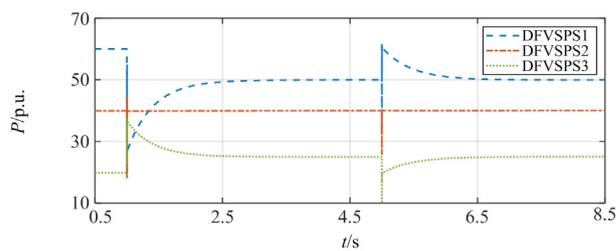
(c) 蓄水状态标幺值



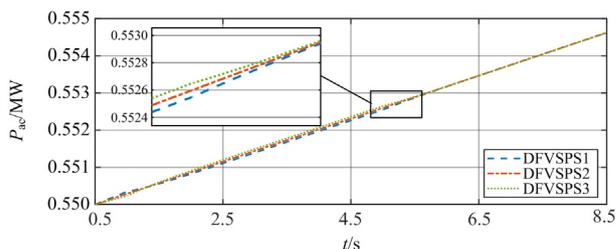
(d) 有功功率标幺值一致性因子

图 7 分布式变速抽蓄有功功率一致性协调控制仿真结果
Fig. 7 Simulation results of distributed variable speed pumping active power consistent and coordinated control

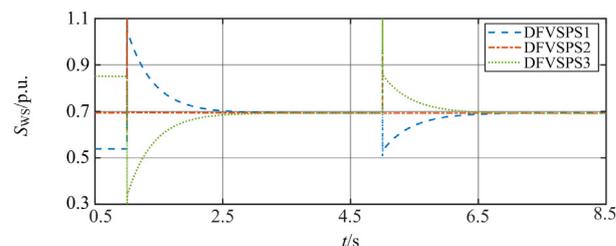
图 8 为分布式变速抽蓄 SWS 一致性协调控制仿真结果。1 s 时加入有功功率标幺值一致性控制, 5 s 时加入 SWS 一致性控制。可以发现, 未加入 SWS 一致性协调控制时分布式变速抽蓄蓄水状态曲线与蓄水状态一致性因子曲线平行但不收敛, 5 s 时加入 SWS 一致性协调控制后有功功率产生波动, 不同变速抽蓄蓄水状态与 SWS 一致性因子不断迭代, 在 6 s 左右达到收敛。



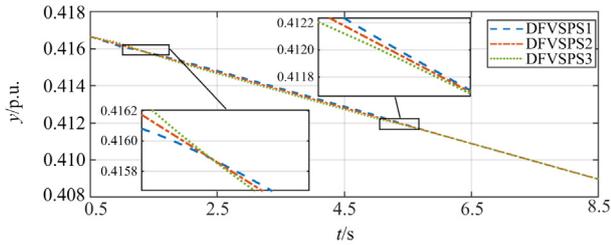
(a) 有功功率标幺值



(b) 有功功率实际值



(c) 蓄水状态标幺值



(d) 蓄水状态标幺值一致性因子

图 8 分布式变速抽蓄 SWS 一致性协调控制仿真结果

Fig. 8 Simulation results of distributed variable speed pumping SWS consistent and coordinated control

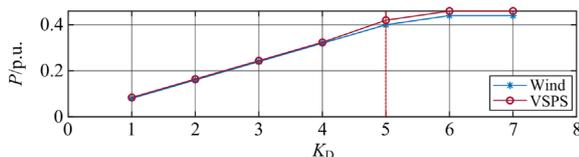
4.2 风电与分布式变速抽蓄协同调频控制

对图 7 所示系统设置在 8 s 时负荷 9 突增 700 MW, 10 s 时风机转速开始恢复。对系统频率事件采用的各控制策略具体描述如表 2 所示。其中风电场由 3 台风机聚合而成, 每台风机容量为 100 MW, 认为 3 台风机相距较近, 无风速差别, 风机控制策略相同, 转速一致。转速恢复曲线设置恢复时间为 5 s。风机与变速抽蓄机组频率控制参数如表 3 所示, 各参数根据式(7)一式(10)计算后综合考虑得到, 首先单独考虑在不同虚拟惯量控制参数 K_J 下风机和变速抽蓄出力大小, 选择使机组出力最大情况下的一次调频参数 K_D ; 其次固定 K_D 改变虚拟惯量控制参数 K_J , 使得机组出力最大, 选择 K_J 。控制参数对机组发出功率的影响如图 9 所示, 机组本身可用容量有限, 当参数过大时超出机组出力范围, 机组提前达到出力限值; 反之当参数过小时调频效果较差, 难以发挥调频能力。

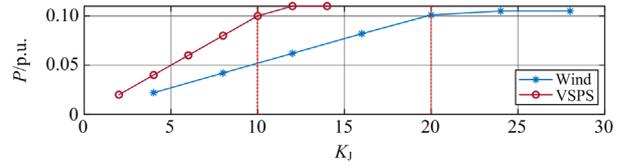
表 2 各控制策略描述及特点

Table 2 Description and characteristics of each control strategy

控制简称	控制策略含义	特点
Wind	仅风电参与调频	仅在中风速参与调频, 易造成频率二次跌落
DVSPS	仅多台变速抽蓄参与调频	调频容量较小, 部分变速抽蓄出力易提前达到限值
WDDNC	风电场与分布式变速抽蓄无协同调频控制	调频容量较大, 但风机转子转速恢复易造成系统频率二次跌落
WDDWC	风电场与分布式变速抽蓄协同调频控制	调频容量大, 无变速抽蓄出力提前达到限值, 无风电转子转速恢复造成的系统频率二次跌落



(a) 不同虚拟惯量控制参数 K_D 下机组出力



(b) 不同一次调频控制参数 K_J 下机组出力

图 9 不同控制参数下风机和变速抽蓄机组出力

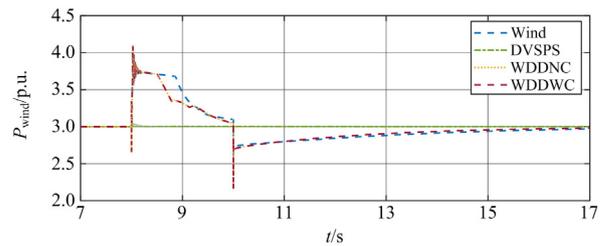
Fig. 9 Output of different control parameters under the wind power and VSPS

表 3 风电与变速抽蓄机组控制参数

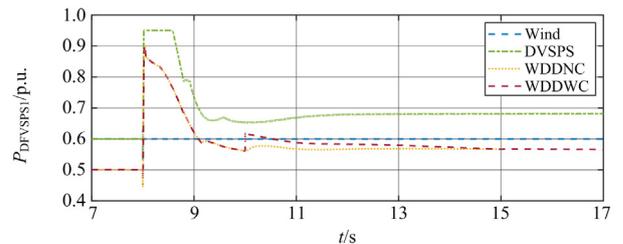
Table 3 Control parameters of wind power and variable speed pumping and storage units

机组类别	虚拟惯量控制参数 K_J	一次调频参数 K_D
风机	-5	-20
变速抽蓄机组 1	-5	-10
变速抽蓄机组 2	-5	-10
变速抽蓄机组 3	-5	-10

图 10 为在 4 种控制方式下风电与 3 台变速抽蓄的功率和系统频率。表 4 为 4 种控制方式下系统频率最低点和系统频率二次跌落最低点。仅有风机时, 只能在中风速下参与调频, 且风电在调频后进行转子转速恢复时易造成系统频率二次跌落。仅有多台变速抽蓄调频时, 机组调频容量有限, 且不同变速抽蓄机组可用容量不同, 部分机组有功功率输出达到限制。当风电与分布式变速抽蓄分别进行调频控制时, 调频容量较大, 且变速抽蓄间具有一致性控制, 另外两台变速抽蓄可以分担一部分调频功率, 因此变速抽蓄出力均未达到限制; 当风电与分布式变速抽蓄进行协同调频控制时, 能够参与系统调频



(a) 风机有功功率



(b) 变速抽蓄 1 号有功功率

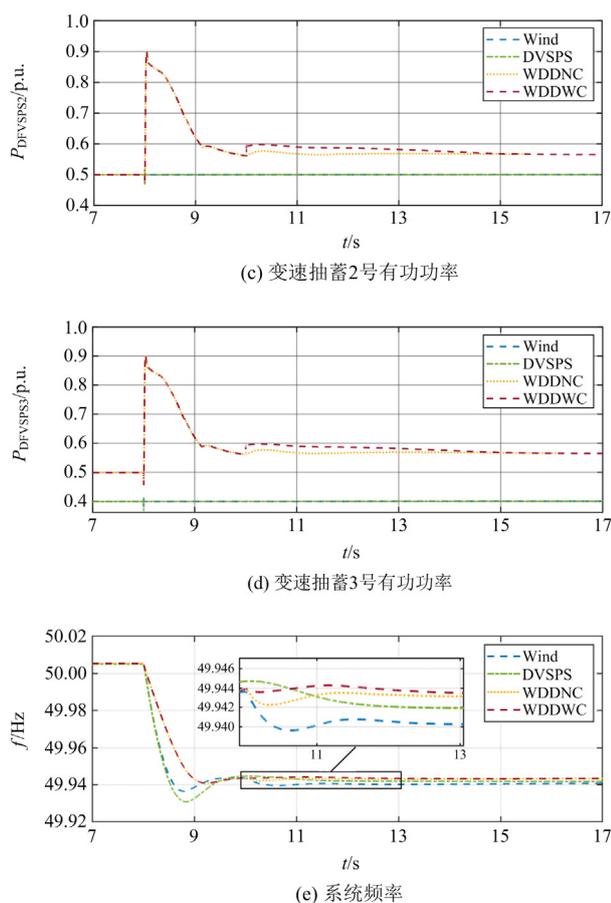


图 10 不同控制策略下风机有功功率、变速抽蓄有功功率和系统频率

Fig. 10 Wind turbine active power, variable speed pumped storage active power, and system frequency under different control strategies

表 4 不同控制策略下系统频率最低点和二次跌落最低点
Table 4 Lowest frequency of the system and the lowest secondary drop under different control strategies

控制简称	系统频率最低点/Hz	频率二次跌落最低点/Hz
Wind	49.931	49.9395
DVSPS	49.936	49.9420
WDDNC	49.940	49.9422
WDDWC	49.940	49.9440

的容量更大, 无变速抽蓄出力达到限值, 且抑制了风电转子转速恢复带来的系统频率二次跌落, 综上所述可以证明分布式协调控制的有效性和优越性。

5 结论

本文提出了一种风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制策略。该控制策略分为两层, 第一层当电网发生频率事件时, 根据风电风速和区域内

多分布式变速抽蓄实时可用容量对电网提供频率支撑; 第二层针对风电调频后转子转速恢复过程容易引发系统频率二次跌落的问题, 在风电转子转速恢复时多分布式变速抽蓄提供功率支撑, 缓解系统频率二次跌落。

以含有风电场与分布式变速抽蓄的四机两区域系统为例进行研究, 仿真结果表明:

1) 在多分布式变速抽蓄场站间, 主导机组产生附加调频控制信号, 其余非主导机组通过有功功率与 SWS 一致性因子跟踪主导机组, 实现分布式变速抽蓄间的协调控制;

2) 该控制策略充分发挥了风电场与多分布式变速抽蓄的调频能力, 协同控制的调频效果优于仅有风电或变速抽蓄;

3) 在风电参与调频后的转子转速恢复阶段, 分布式变速抽蓄会根据实时可用容量对风电提供功率支撑, 减少其在系统中吸收的能量, 缓解系统频率二次跌落深度。

后续研究将针对多分布式变速抽蓄与 SVC 等无功补偿设备间的协调控制策略开展。

参考文献

- [1] 李振奎, 甘德强, 栾某德, 等. 基于全状态模型的自同步电压源并网系统频率稳定分析[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 182-192.
- LI Zhenyao, GAN Deqiang, LUAN Moude, et al. Frequency stability analysis based on full state model in autonomous-synchronization voltage source interfaced power system[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 182-192.
- [2] 马睿聪, 刘福锁, 曹永吉, 等. 电力系统频率动态与功角振荡的耦合特性分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 102-112.
- MA Ruicong, LIU Fusuo, CAO Yongji, et al. Coupling characteristic analysis of power system frequency dynamic and power angle oscillation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 102-112.
- [3] 蒋小亮, 刘万勋, 严格, 等. 多直流馈入受端电网主网架承载能力评估研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 216-225.
- JIANG Xiaoliang, LIU Wanxun, YAN Ge, et al. Evaluation of carrying capability of the main grid of multi-infeed HVDC receiving-end systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 216-225.
- [4] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
- WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in

- China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [5] 李俊辉. 可变速抽水蓄能机组发电工况一次调频特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
LI Junhui. Study on primary frequency modulation characteristics of variable speed pumped storage unit under power generation conditions[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [6] 赵强. 双馈式可变速抽水蓄能机组建模与电网频率控制[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
ZHAO Qiang. Modeling and control of doubly fed variable-speed pumped storage units for grid frequency regulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [7] 李辉, 刘海涛, 宋二兵, 等. 双馈抽水蓄能机组参与电网调频的改进虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 58-65.
LI Hui, LIU Haitao, SONG Erbing, et al. Improved virtual inertia control strategy of doubly-fed pumped storage unit for power network frequency modulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(10): 58-65.
- [8] ZOU Jin, ZHU Jizhong, XIE Pingping, et al. Regulating short-time wind power fluctuation by variable speed pumped storage unit[C]// 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 4-8, 2019, Atlanta, GA, USA: 1-5.
- [9] 罗远翔, 李鑫明, 潘超, 等. 含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 76-85.
LUO Yuanxiang, LI Xinming, PAN Chao, et al. Coordinated frequency modulation strategy of doubly fed pumped storage units with wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 76-85.
- [10] 于倩倩, 杨德权, 徐玲君, 等. 中小型抽水蓄能电站合理发展探讨[J]. 水力发电, 2021, 47(8): 94-98.
YU Qianqian, YANG Dequan, XU Lingjun, et al. Brief analysis on the reasonable development of small and medium-scale pumped-storage power stations[J]. Water Power, 2021, 47(8): 94-98.
- [11] 周学志, 徐玉杰, 谭雅倩, 等. 小型抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J]. 中外能源, 2017, 22(8): 87-93.
ZHOU Xuezhi, XU Yujie, TAN Yaqian, et al. Development status and application prospects of small-scale pumped hydro energy storage technology[J]. SINO-Global Energy, 2017, 22(8): 87-93.
- [12] 桑林卫, 卫璇, 许银亮, 等. 抽水蓄能助力风光稳定外送的最佳配置策略[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 86-90, 123.
SANG Linwei, WEI Xuan, XU Yinliang, et al. The optimal allocation strategy of pumped storage for the collaborative operation with wind/solar generation[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 86-90, 123.
- [13] 马玉路. 风储联合运行参与电网一次调频优化控制技术[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.
MA Yulu. Optimal control technology of primary frequency regulation in power grid with wind-storage combined operation[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2022.
- [14] 梁丹琦. 考虑频率二次跌落抑制的双馈风机主动调频控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
LIANG Danqi. A study of DFIG's frequency regulation control scheme considering suppression of second frequency dip[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [15] 游文霞, 刘斌, 李世春, 等. 风电并网下的抽水蓄能鲁棒最优调频控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 32-40.
YOU Wenxia, LIU Bin, LI Shichun, et al. Robust optimal frequency regulation control strategy for pumped storage in grid-connected wind power systems[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 32-40.
- [16] 鲍威宇. 风电惯量参与电网调频的控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
BAO Weiyu. Studies on participation of wind power inertia in power system frequency control[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [17] 陈磊, 庄俊, 王志远, 等. 柔性直流输电系统的变速抽水蓄能机组直流电压辅助控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 154-162.
CHEN Lei, ZHUANG Jun, WANG Zhiyuan, et al. Auxiliary control strategy of DC voltage for variable speed pumped storage units in an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 154-162.
- [18] 孙雪薇. 双馈风电机组惯量和一次频率调节与场站储能协调控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
SUN Xuewei. Research on coordinated control method of inertia and primary frequency regulation for doubly-fed induction generator based wind turbine and station energy storage[D]. North China Electric Power University, 2021.
- [19] 颜湘武, 王德胜, 隗小雪, 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): 5911-5923.
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): 5911-5923.
- [20] 董天翔, 翟保豫, 李星, 等. 风储联合系统参与频率响应的优化控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3980-3989.
DONG Tianxiang, ZHAI Baoyu, LI Xing, et al. Optimal

- control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3980-3989.
- [21] YANG J, YANG T, LUO L, et al. Tracking-dispatch of a combined wind-storage system based on model predictive control and two-layer fuzzy control strategy[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(4): 974-989.
- [22] 杨丘帆, 黄煜彬, 石梦璇, 等. 基于一致性算法的直流微电网多组光储单元分布式控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 3919-3928.
YANG Qiufan, HUANG Yubin, SHI Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 3919-3928.
- [23] 胡泽春, 夏睿, 吴林林, 等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. *电网技术*, 2016, 40(8): 2251-2257.
HU Zechun, XIA Rui, WU Linlin, et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(8): 2251-2257.
- [24] DIAZ-GONZALEZ F, HAU M, SUMPER A, et al. Coordinated operation of wind turbines and flywheel storage for primary frequency control support[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 68: 313-326.
- [25] 王若谷, 李恒毅, 高欣, 等. 基于输入-状态稳定性理论的双馈风机稳定性分析[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2): 83-89.
WANG Ruogu, LI Hengyi, GAO Xin, et al. Stability analysis of DFIG-based wind turbine via input to state stability theory[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2): 83-89.
- [26] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡分数阶 PI 控制[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 12-20.
LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, et al. Virtual resistance-based fractional-order PI control strategy for sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind turbines[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(5): 12-20.
- [27] 刘辉, 葛俊, 巩宇, 等. 风电场参与电网一次调频最优方案选择与风储协调控制策略研究[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(1): 44-52.
LIU Hui, GE Jun, GONG Yu, et al. Optimization scheme selection of wind farm participation in grid primary frequency modulation and study of wind-storage coordination control strategy[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(1): 44-52.
- [28] 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.
- [29] XIA Y Y, AHMED K H, WILLIAMS B W. Wind turbine power coefficient analysis of a new maximum power point tracking technique[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(3): 1122-1132.
- [30] 姚雅涵, 姚伟, 熊永新, 等. 经多端直流并网的海上风电场调频协同控制和风机转速恢复策略[J]. *高电压技术*, 2021, 47(10): 3537-3548.
YAO Yahan, YAO Wei, XIONG Yongxin, et al. Coordinated frequency support and wind turbine preset restoration scheme of VSC-MTDC integrated offshore wind farms[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(10): 3537-3548.

收稿日期: 2023-11-28; 修回日期: 2024-04-24

作者简介:

井浩然(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行; E-mail: hr_jing@foxmail.com

姚伟(1983—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为含高比例新能源的交直流电力系统的稳定性分析与控制。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 张颖)