

全功率小型变速抽水蓄能机组双层 MPC 虚拟惯量控制策略

许常昊¹, 关伟东¹, 王越¹, 张金帅², 王鹏², 周宁², 尚博文²

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 国网河南省电力公司
电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 在配电侧发展微型可变速抽水蓄能, 有利于以更为环保的方式提升配网消纳新能源的能力。提出一种全功率变速抽水蓄能机组双层模型预测控制 (two layer model predictive control, TLMPC) 虚拟惯量控制策略。该策略包含一个标准层模型预测控制 (model predictive control, MPC) 和辅助层 MPC, 标准层 MPC 基于确定的系统预测模型, 产生最小化的频率偏差信号, 传递给辅助层 MPC, 而辅助层 MPC 考虑光伏的随机性, 以跟踪标准层 MPC 预测的频率偏差为目标, 同时产生功率和导叶控制信号。通过对含有全功率抽水蓄能机组的系统进行仿真分析, 表明了所提的控制策略具有良好的频率调节性能, 有助于提升配电网的光伏消纳能力。

关键词: 变速抽水蓄能机组; 全功率变流器; 虚拟惯量控制; 调频控制; 模型预测控制

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202311005

0 引言

随着风电、光伏等可再生能源渗透率逐渐提高, 电力系统的调频调峰问题日渐凸显^[1-2]。为提升配电网侧消纳新能源的能力, 在环境条件适宜的条件下发展小型抽水蓄能具有广阔的前景^[3]。相比于电化学储能, 除寿命和环保优势外^[4-5], 变速抽水蓄能机组同样具有功率解耦、响应速度快等优点, 是现阶段抽水蓄能技术发展的主要方向之一^[6]。

随着分布式能源总量的不断增加, 变速抽水蓄能机组的最优运行和控制策略对满足配电网稳定的需求至关重要, 传统的线性 PID 控制不能系统考虑固有的非线性约束, 应对不确定性能力低^[6], 随着新能源在电力系统中的比例上升, 传统的虚拟惯量控制^[7-8]、下垂控制^[9-10]不能完全发挥抽水蓄能机组频率调节性能^[11-13]。微型变速抽水蓄能

机组主要有 2 种: 一种是双馈型变速抽水蓄能机组, 一种是全功率型变速抽水蓄能机组。与双馈式机组相比, 全功率机组的控制系统、变速运行范围及应对故障扰动能力更有优势。目前, 国内外对变速抽水蓄能机组的研究主要集中在大型抽水蓄能系统建模方面, 文献^[14]建立了考虑电机暂态特性的双馈抽水蓄能电站水-机-电耦合的过渡过程计算模型, 并基于定子电压矢量控制策略, 建立了双馈感应电机的功率控制系统。文献^[15]分析了全功率变速抽水蓄能机组在发电工况和电动工况下的功率调节特性和方法, 研究了机侧和网侧变流器的数学模型和控制策略。文献^[16]在全功率变速抽蓄的基本控制原理的基础上, 提出了变速抽水蓄能机组无功优化控制策略, 验证了该控制策略可在弱电网故障及故障恢复期间优先向系统提供无功支撑能力。文献^[17]提出了全功率抽水蓄能机组在发电状态下的小信号模型和电磁暂态仿真模型, 并用特征值法分析小信号稳定性。文献^[18]提出了全功率抽水蓄能电站在发电工况和电动工况变速运行的稳态控制策略, 并提出了启动以及运行状态切换的控制策略。文献^[19]分析了全功率抽水蓄能机组多控制

收稿日期: 2023-11-03; **修回日期:** 2024-04-09。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (面向配电网分布式新能源消纳的微型抽水蓄能关键技术研究及装备研制, 5400-202324196A-1-1-ZN)。

模式震荡特性和功频响应特性，提出了机侧发电工况快速频率控制与快速功率控制相结合的控制策略，以及水泵工况定导叶开度变转速控制策略。文献[20]基于双馈抽水蓄能机组的数学模型，提出了一种带比例-微分环节的改进虚拟惯性调频控制策略。

目前有关微型抽水蓄能机组控制方法的研究并不多见，本文针对含高比例光伏微电网的功率波动抑制问题，提出了全功率变速抽水蓄能机组双层模型预测控制（two layer model predictive control, TLMPC）虚拟惯量控制策略。该策略的标准层模型预测控制（model predictive control, MPC）基于确定的系统预测模型，以频率偏差最小化为目标，产生频率偏差信号，传递给辅助层 MPC，而辅助层 MPC 考虑光伏随机性，以标准层 MPC 预测的频率偏差为目标，产生控制信号。为加快转速恢复速度，本文设计了附加的导叶控制指令，同时兼顾转速安全。通过仿真验证了本文所提策略的有效性。

1 全功率抽水蓄能机组的数学模型

1.1 可逆水泵水轮机数学模型

发电工况下水泵水轮机运行在水轮机模式，等效为常规水轮机，其数学模型[21]为

$$\begin{cases} H_d = \left(\frac{Q_d}{G}\right)^2 \\ \frac{dQ_d}{dt} = \frac{H_s - H_d}{T_w} \end{cases} \quad (1)$$

式中： H_d 为有效水头； Q_d 为管道的流量； G 为水轮机导叶开度； H_s 为静态水头； T_w 为水流惯性时间常数。

水轮机模式下机械功率 P_t 为

$$P_t = 9.81\eta_t H_d Q_d \quad (2)$$

式中： η_t 为水轮机效率。

电动工况下水泵水轮机运行在水泵模式，其水泵工况运行点取决于水泵性能曲线 h_p-Q_p 和水泵管路特性 $h_{need}-Q_p$ 的交点，即

$$\begin{cases} h_p = a_0\omega_r^2 + a_1\omega_r Q_p + a_2 Q_p^2 \\ h_{need} = h_s + f_e Q_p^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： a_0 ， a_1 ， a_2 为曲线拟合系数； ω_r 为水泵转速； h_p 为扬程； h_{need} 为泵升过程所需总扬程； h_s

为静扬程； Q_p 为管道的流量； f_e 为水泵摩擦系数。

最优转速和最优导叶开度可以通过线性关系进行近似[22-23]，其表达式为

$$\begin{cases} \omega_{ref}(P_{ref}, H_d) = -0.05 + 1.25(P_{ref} - 0.8) - 0.25(H_d - 0.8) \\ G_{ref}(P_{ref}, h_p) = 0.8 + (P_{ref} - 0.8) - (h_p - 0.8) \end{cases} \quad (4)$$

式中： ω_{ref} 为水泵水轮机最优转速； G_{ref} 为水泵水轮机最优导叶； P_{ref} 为机组有功功率指令。

跟网（grid following）模式下，发电工况、电动工况分别通过转速寻优和导叶开度寻优实现最优效率运行，其控制框图如图1所示。

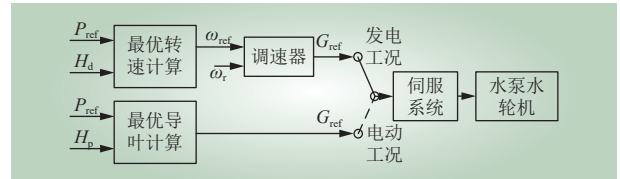


图1 水泵水轮机控制策略框图
Fig. 1 The block diagram of pump turbine control strategy

1.2 永磁同步电机

电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (5)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = n_p(i_{sq}\psi_{sd} - i_{sd}\psi_{sq}) \quad (7)$$

式中： u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、 ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 分别为 d 、 q 轴定子电压、电流和磁链分量； R_s 为电机定子绕组电阻； ω_s 为电机的电角速度； L_{sd} 和 L_{sq} 分别为永磁同步电机 d 、 q 轴上的电感； ψ_f 为永磁体在定子上产生的耦合磁链； T_e 为电机电磁转矩； n_p 为磁极对数。

2 全功率抽水蓄能机组虚拟惯量控制策略

全功率变速抽水蓄能机组的转速控制一般通过调节可逆水泵水轮机导叶开度来实现，而有功功率、无功功率以及直流母线电压则通过全功率背靠背变流器进行灵活控制[24-25]。变速抽蓄若要

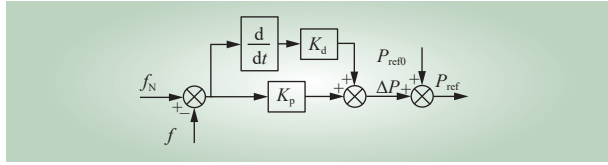


图 5 传统虚拟惯量控制策略框图

Fig. 5 The block diagram of the traditional virtual inertial control strategy

式中： ΔP 为有功参考值的增量； Δf 为系统频率差频； K_p 为下垂控制系数； K_d 为惯性控制系数。

3 全功率抽水蓄能机组双层 MPC 虚拟惯量控制策略

3.1 控制策略框架

MPC 策略的基本原理为：在每一个采样时刻，根据获得的当前测量信息，在线求解一个有限时间开环优化问题，并将得到的控制序列的第一个元素作用于被控对象。面向光伏波动的抑制问题，本文提出全功率抽水蓄能机组双层 MPC 虚拟惯量控制策略，整体框架如图 6 所示。双层 MPC 虚拟惯量控制器由标准层 MPC 和辅助层 MPC 组成。标准层 MPC 以不考虑光伏功率波动的确定性预测模型为基础，对系统最小的频率偏差 $\Delta f_{std,i}$ 和最小的转速偏差 $\Delta \omega_{std,i}$ 进行预测；辅助层 MPC 以 $\Delta f_{std,i}$ 、 $\Delta \omega_{std,i}$ 为目标，以考虑光伏波动的随机性预测模型为基础，产生虚拟惯量控制信

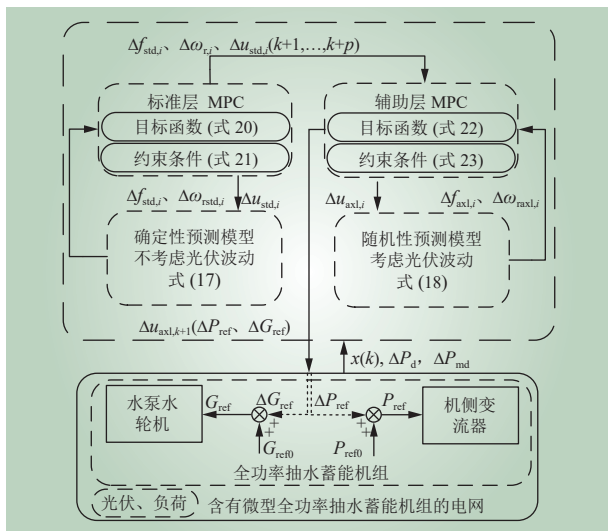


图 6 双层 MPC 虚拟惯量控制流程

Fig. 6 Flowchart of the two-layer MPC virtual inertia control strategy

号 ΔP_{ref} 和附加导叶指令 ΔG_{ref} 。以下分别阐述“确定性预测模型”和“随机性预测模型”。

3.2 预测模型建立

3.2.1 全功率变速抽水蓄能机组简化模型

将全功率抽水蓄能机组电磁暂态响应表达为一阶滞后环节，所得的简化模型如图 7 所示，其传递函数为

$$\begin{cases} \Delta P_S = \Delta P_{ref} \frac{1}{1+sT_c} \\ \Delta \omega_r = \frac{(\Delta P_m - \Delta P_S)}{(Js+B)\omega_r} \\ \Delta P_m = \Delta y \left(\frac{1-T_w s}{1+0.5T_w s} \right) \\ \Delta y = \Delta G \left(\frac{1}{1+sT_y} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中： ΔP_S 为机组的有功功率变化量； ΔP_{ref} 为虚拟惯量控制器生成的功率指令； J 为永磁同步电机的惯性时间常数； B 为永磁同步电机的摩擦系数； T_c 为全功率抽水蓄能机组有功功率响应时间常数； T_y 为电液随动系统响应时间常数； T_w 为水流惯性时间常数； ΔP_m 为机组的机械功率变化量； ΔG 为导叶开度指令变化量； Δy 为实际导叶开度变化量，当机组有功功率变化时，近似认为机组转速为额定转速，即 $\omega_r = \omega_N$ 。

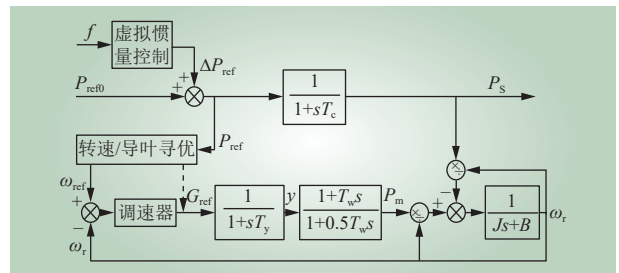


图 7 全功率抽水蓄能机组简化模型

Fig. 7 Simplified model of the pumped-storage unit with full-size converter

3.2.2 频率响应模型

含有全功率抽水蓄能机组的电网频率响应模型如图 8 所示，系统频率偏差与功率扰动之间的一般化关系表达式为

$$\Delta f = \frac{1}{2Hs+D} (\Delta P_G - \Delta P_L) \quad (14)$$

式中： ΔP_G 为系统发电的功率变化量； ΔP_L 为负荷的功率变化量； H 为电网惯性时间常数； D 为电网负荷调节系数。

鉴于本文考虑的微型抽蓄工作在配网侧，主要发电资源包括光伏、小型燃油/气机组以及微型抽蓄，因此，在本文背景下， ΔP_G 具体包括火电机组功率变化量 ΔP_{TTP} 、光伏功率变化量 ΔP_{PV} 、全功率抽水蓄能机组的功率变化量 ΔP_S 。

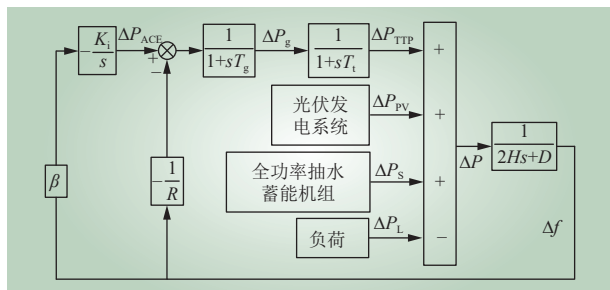


图 8 含有全功率抽水蓄能机组的电网频率响应模型
Fig. 8 Frequency response model of the grid with a pumped-storage unit with full-size converter

由于可控机组一般采用下垂控制，则 ΔP_{TTP} 可由式 (15) 进行预测。

$$\Delta P_{TTP} = \left(\frac{1}{1+sT_g} \right) \left(\frac{1}{1+sT_t} \right) \left(\Delta P_{ACE} - \frac{1}{R} \Delta f \right) \quad (15)$$

式中： T_g 为火电机组调速器时间常数； T_t 为气容时间常数； R 为火电机组调差系数； ΔP_{ACE} 为二次调频控制器功率变化量，由式 (16) 进行计算。

$$\Delta P_{ACE} = -\beta \frac{K_i}{s} \Delta f \quad (16)$$

式中： β 为频率偏差因子； K_i 为二次调频控制器积分增益常数。

3.2.3 控制量预测模型

基于上述机组仿真模型和频率预测模型，标准层 MPC 采用忽略光伏随机性确定性功率波动预测模型，即联立式 (13) ~ (16) 所得的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\text{std}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_{\text{std}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_{\text{std}}(t) + \mathbf{E}\Delta P_d(t) \\ \mathbf{y}_{\text{std}}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}_{\text{std}}(t) \\ \mathbf{x}_{\text{std}}^T = [\Delta f \ \Delta P_{TTP} \ \Delta P_g \ \Delta P_{ACE} \ \Delta P_S \ \Delta \omega_r \ \Delta P_m \ \Delta y]^T \\ \mathbf{y}_{\text{std}}^T = [\Delta f \ \Delta \omega_r]^T \\ \mathbf{u}_{\text{std}}^T = [\Delta P_{\text{ref}} \ \Delta G]^T \end{cases} \quad (17)$$

式中： $\mathbf{x}_{\text{std}}(t)$ 、 $\mathbf{y}_{\text{std}}(t)$ 、 $\mathbf{u}_{\text{std}}(t)$ 分别为标准层 MPC 的状态变量、输出变量、控制信号； ΔP_g 为调速器输出功率变化量； $\Delta \omega_r$ 为机组最优转速与实际转速的差值； ΔP_d 为系统负荷功率变化量。

辅助 MPC 考虑光伏的随机性，采用随机性预

测模型进行预测，其状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_{\text{axl}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}_{\text{axl}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}_{\text{axl}}(t) + \mathbf{E}\Delta P_d(t) + \mathbf{F}\Delta P_{\text{md}}(t) \\ \mathbf{y}_{\text{axl}}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}_{\text{axl}}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\mathbf{x}_{\text{axl}}(t)$ 、 $\mathbf{y}_{\text{axl}}(t)$ 、 $\mathbf{u}_{\text{axl}}(t)$ 为辅助层 MPC 的状态变量、输出变量、控制信号，与标准层 MPC 中的状态变量、输出变量、控制信号矩阵形式相同； ΔP_{md} 为随机性功率变化量，本文中的随机性功率为光伏功率，即 $\Delta P_{\text{md}} = \Delta P_{PV}$ 。本文假设负荷功率变化量 ΔP_d 、 ΔP_{md} 可以通过上级主站下发得到。

式 (17) (18) 的状态矩阵 $\mathbf{A}$ 如式 (19)，控制输入矩阵 $\mathbf{B} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -2/T_y \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ，扰动矩阵 $\mathbf{E} = [-1/2H \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ，可测量扰动 $\mathbf{F} = [1/2H \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ，输出矩阵 $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ 。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{D}{2H} & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & \frac{1}{2H} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_t} & \frac{1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{RT_g} & 0 & -\frac{1}{T_g} & \frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta K_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{J} & -\frac{B}{J} & \frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{T_w} & \frac{2}{T_w} + \frac{2}{T_y} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_y} \end{bmatrix} \quad (19)$$

3.3 双层 MPC 虚拟惯量控制策略

全功率变速抽水蓄能机组利用储存在水泵水轮机转子中的动能参与系统调频，当改变机组功率参考值时，因水泵水轮机机械响应速度慢于逆变器的电磁响应速度，机组转速将偏离最优转速，运行效率下降。为加快转速的恢复速度，及时补充或释放转子动能，本文设计的双层 MPC 虚拟惯量控制，同时输出导叶控制，以协助转子转速的快速恢复。所提的双层 MPC 虚拟惯量控制策略详述如下。

3.3.1 标准层 MPC

标准层 MPC 基于式 (17) 的确定性预测模型，以系统频率偏差 Δf_{MPC} 和机组转速偏差 $\Delta \omega_{\text{MPC}}$ 作为待优化的输出变量，建立的目标函数为

$$\min_u \sum_{k=0}^p \left\{ [\Delta f_{\text{std}}(k+1) - \Delta f_{\text{ref, std}}]^T W_{o1}^{\text{std}} [\Delta f_{\text{std}}(k+1) - \Delta f_{\text{ref, std}}] + [\Delta \omega_{r, \text{std}}(k+1) - \Delta \omega_{r, \text{ref, std}}]^T W_{o2}^{\text{std}} [\Delta \omega_{r, \text{std}}(k+1) - \Delta \omega_{r, \text{ref, std}}] \right\} + \sum_{k=0}^c [\Delta u_{\text{std}}(k)]^T W_u^{\text{std}} [\Delta u_{\text{std}}(k)] \quad (20)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{std}}^{\min} \leq \Delta f_{\text{std}} \leq \Delta f_{\text{std}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{S, std}}^{\min} \leq \Delta P_{\text{S, std}} \leq \Delta P_{\text{S, std}}^{\max} \\ \Delta \omega_{r, \text{std}}^{\min} \leq \Delta \omega_{r, \text{std}} \leq \Delta \omega_{r, \text{std}}^{\max} \\ \Delta u_{\text{std}}^{\min} \leq \Delta u_{\text{std}} \leq \Delta u_{\text{std}}^{\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中： W_{o1}^{std} 、 W_{o2}^{std} 分别为标准层 MPC 频率变化量和转速变化量的权重因子； W_u^{std} 为标准层控制信号的权重因子； p 、 c 为预测区间和控制时域； $\Delta f_{\text{std}}^{\min}$ 、 $\Delta f_{\text{std}}^{\max}$ 分别为预测区间内所允许频率偏差的最小值和最大值； $\Delta P_{\text{S, std}}^{\min}$ 、 $\Delta P_{\text{S, std}}^{\max}$ 分别为变速抽水蓄能机组功率变化量的最小值和最大值； $\Delta \omega_{r, \text{std}}^{\min}$ 、 $\Delta \omega_{r, \text{std}}^{\max}$ 分别为变速抽水蓄能机组转速变化的最小值和最大值； $\Delta u_{\text{std}}^{\min}$ 、 $\Delta u_{\text{std}}^{\max}$ 分别为控制时域内控制信号的最小值和最大值； Δf_{std} 、 $\Delta P_{\text{S, std}}$ 、 $\Delta \omega_{r, \text{std}}$ 、 Δu_{std} 分别为标准层 MPC 的频率偏差、有功功率变化量、机组转速偏差、控制信号偏差。

3.3.2 辅助层 MPC

辅助层 MPC 基于式 (18) 的随机性预测模型，以快速跟踪标准层 MPC 预测的系统频率偏差 $\Delta f_{\text{std}, i}$ 和转速偏差 $\Delta \omega_{\text{std}, i}$ 为目标，建立的目标函数为

$$\min_u \sum_{k=0}^p \left\{ [\Delta f_{\text{axl}}(k+1) - \Delta f_{\text{std}}(k+1)]^T W_{o1}^{\text{axl}} [\Delta f_{\text{axl}}(k+1) - \Delta f_{\text{std}}(k+1)] + [\Delta \omega_{\text{axl}}(k+1) - \Delta \omega_{\text{std}}(k+1)]^T W_{o2}^{\text{axl}} [\Delta \omega_{\text{axl}}(k+1) - \Delta \omega_{\text{std}}(k+1)] \right\} + \sum_{k=0}^c [\Delta u_{\text{axl}}(k+1) - \Delta u_{\text{std}}(k+1)]^T W_u^{\text{axl}} [\Delta u_{\text{axl}}(k+1) - \Delta u_{\text{std}}(k+1)] \quad (22)$$

约束条件为

$$\begin{cases} \Delta f_{\text{axl}}^{\min} \leq \Delta f_{\text{axl}} \leq \Delta f_{\text{axl}}^{\max} \\ \Delta P_{\text{S, axl}}^{\min} \leq \Delta P_{\text{S, axl}} \leq \Delta P_{\text{S, axl}}^{\max} \\ \Delta \omega_{r, \text{axl}}^{\min} \leq \Delta \omega_{r, \text{axl}} \leq \Delta \omega_{r, \text{axl}}^{\max} \\ \Delta u_{\text{axl}}^{\min} \leq \Delta u_{\text{axl}} \leq \Delta u_{\text{axl}}^{\max} \end{cases} \quad (23)$$

式中： W_{o1}^{axl} 、 W_{o2}^{axl} 分别为辅助层 MPC 频率偏差和转速偏差的权重因子； W_u^{axl} 为辅助层 MPC 控制信号的权重因子； Δf_{axl} 、 $\Delta P_{\text{S, axl}}$ 、 $\Delta \omega_{r, \text{axl}}$ 、 Δu_{axl} 分别

为辅助层 MPC 的频率偏差、有功功率变化量、机组转速偏差、控制信号偏差。

4 仿真分析

为了验证本文控制策略的有效性，本文在 Matlab/simulink 环境下搭建了含有全功率抽水蓄能机组和光伏发电系统的测试系统，负荷模型采用异步电动机模型，模拟居民负荷波动，系统结构如图 9 所示。

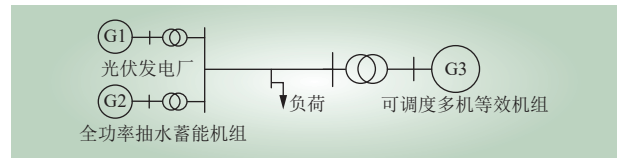


图 9 仿真系统结构框图

Fig. 9 Block diagram of the simulation system structure

全功率抽水蓄能机组水泵水轮机仿真参数如表 1 所示，永磁同步电机及并网系统参数仿真参数如表 2 所示，MPC 虚拟惯量控制器参数如表 3 所示。

表 1 水泵水轮机及其调速系统参数
Table 1 Pump turbine and its speed regulation system parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率 $P_m/(kV \cdot A)$	50	调速器积分系数 K_i	0.5
水流惯性系数 T_w/s	0.5	拟合系数 a_0, a_1, a_2	1.4, -0.2, -0.3
调速器比例系数 K_p	2		

表 2 永磁同步电动机及并网系统参数
Table 2 PMSM and grid-connected system parameters

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_n/kW	50	永磁体磁链 $\psi_f/(V \cdot s)$	0.5
额定电压 V_n/V	800	电网电压 V_n/V	380
额定频率 f_n/Hz	50	直流侧电压 u_{dc}/V	800
极对数	4	滤波电感 L_f/mF	3
d轴电感 L_d/H	0.003 6	滤波电阻 R_f/Ω	0.01
q轴电感 L_q/H	0.003 6		

4.1 机组控制策略验证

发电工况下，无功功率指令设置为 0，在 2 s 时，有功功率指令由 50 kW 变为 45 kW，机组的转速、有功功率如图 10 所示。

表 3 调频控制器参数
Table 3 Frequency controller parameters

参数	数值	参数	数值
采样周期 T/s	0.1	永磁同步电机机组 系数 J, B	6, 0.04
预测时域 p	10	电网惯性时间常数 M/s	2
火电机组调差系数 R	0.03	负荷调节系数 D/s	1
火电机组调速器施加 常数 T_g/s	0.3	传统PD控制比例系数 K_p	5
抽蓄有功响应时间常数 T_c/s	0.6	传统PD控制微分系数 K_d	1

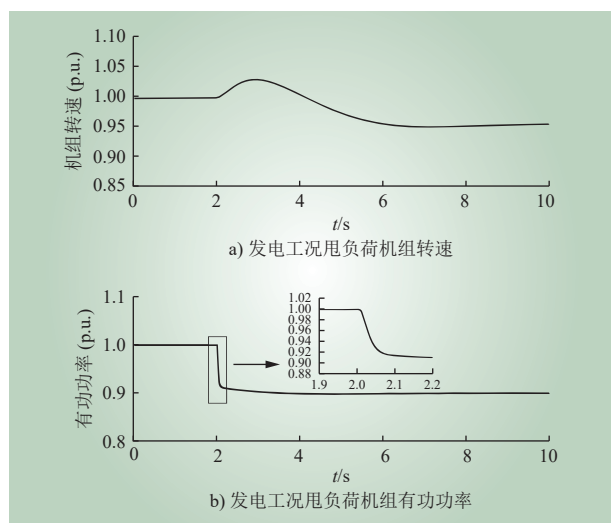


图 10 发电工况甩负荷仿真结果

Fig. 10 Load shedding simulation results for power generation condition

电动工况下，无功功率指令设置为 0，在 2 s 时，有功功率指令由 50 kW 变为 45 kW。机组的转速、有功功率如图 11 所示。

由图 10、图 11 可以看出，当给机组施加甩 10% 负荷指令时，全功率变速抽水蓄能机组在发电、电动工况下均可以做出快速的功率响应，并且根据所施加的功率指令实现变速运行。

4.2 双层 MPC 虚拟惯量控制策略验证

4.2.1 发电工况

在发电工况下，机组功率指令为 0.9 p.u.，仿真时长为 100 s，MPC 控制器采样周期为 0.1 s，预测时域 p 为 10，光照强度变化量及居民负荷波动如图 12 所示。对机组使用传统 PD 控制、MPC 控制以及 TLMPC 控制时，系统频率、机组转速以及有功功率的变化情况，仿真结果如图 13 所示。

计算系统频率变化量与机组转速与最优转速

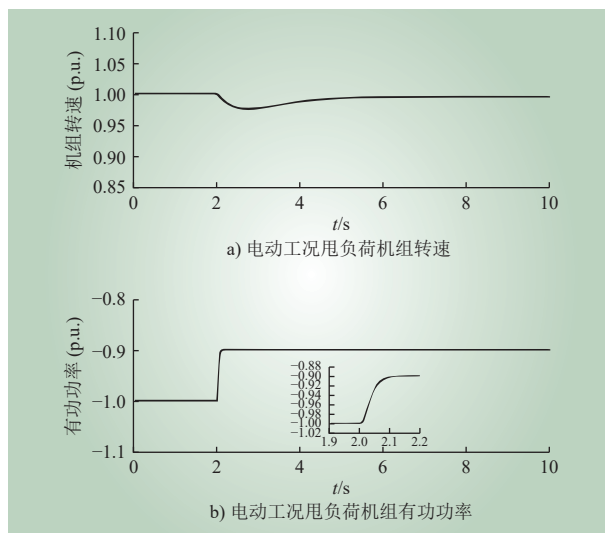


图 11 电动工况甩负荷仿真结果

Fig. 11 Load shedding simulation results for pump condition

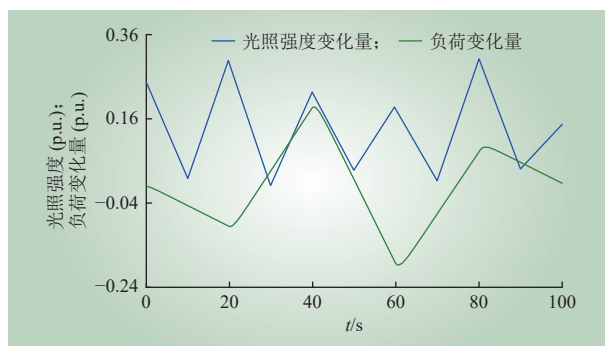


图 12 光照强度、负荷的波动

Fig. 12 Fluctuations of solar irradiation and load

差值的均方根 (root mean square, RMS) 的值，结果如表 4 所示。RMS 计算公式为

$$\begin{cases} R_{MS\Delta f} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\Delta f)^2} \\ R_{MS\Delta \omega_r} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\Delta \omega_r)^2} \end{cases} \quad (24)$$

由图 13 可以看出，PD 控制机组提供的有功功率支撑相对较小，当系统出现功率波动时，相对于采用 MPC 和 TLMPC 的虚拟惯量控制，机组有功功率响应速度较慢。采用 MPC 和 TLMPC 的虚拟惯量控制由于可以检测到光伏和负荷的功率变化，在短时间内迅速响应，机组的出力变化范围更大，系统的频率差的 RMS 值更小，同时两者转速差的 RMS 值均小于采用传统 PD 控制下的

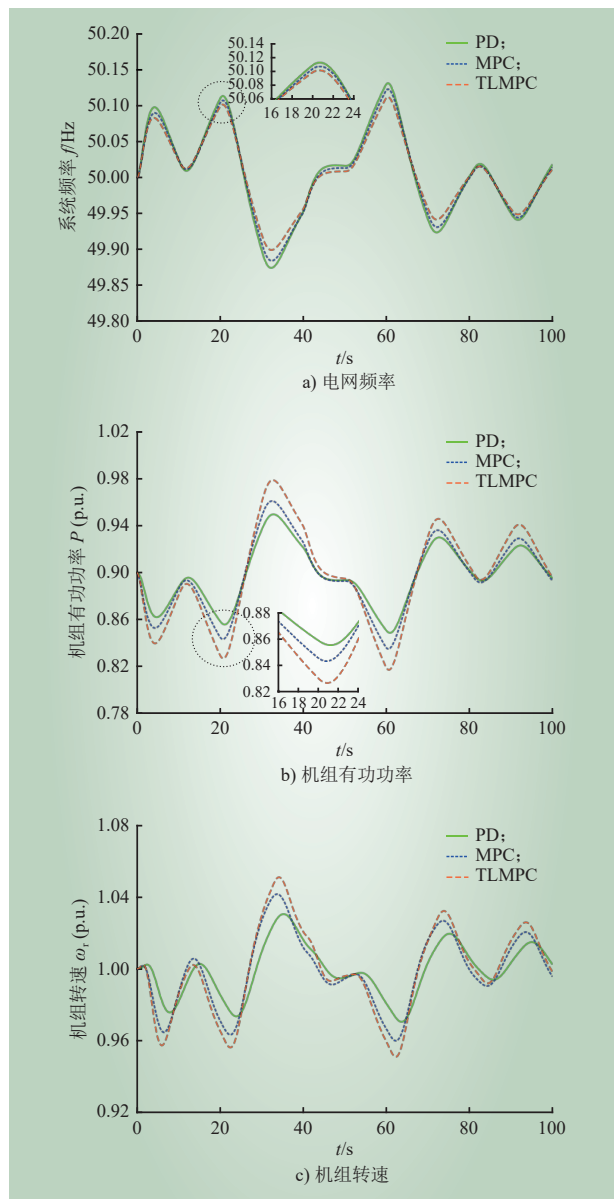


图 13 发电工况仿真结果

Fig. 13 Simulation results of power generation condition

表 4 发电工况系统频率差和转速差的 RMS 值

Table 4 RMS values of system frequency difference and speed difference under power generation condition

控制策略	$R_{MS\Delta f}$	$R_{MS\Delta\omega r}$
PD	0.063	0.0082
MPC	0.059	0.0078
TLMPC	0.053	0.0078

RMS 值，说明转子动能得到及时补充或释放，机组转速在与最优转速相差更小的情况下，提供了更大的有功功率支撑。采用 TLMPC 控制相比于单层 MPC 控制在更大程度上释放的机组的有功支

撑能力，系统的频率差的 RMS 值更小，同时机组的转速差的 RMS 值与单层 MPC 基本一致，因此在发电工况下，TLMPC 虚拟惯量控制策略可以兼顾系统频率恢复和机组转速恢复。

4.2.2 电动工况

在电动工况下，机组功率指令为 0.9 p.u.，仿真时长、光照强度及负荷波动同发电工况一致，对比机组使用传统 PD 控制、MPC 控制以及 TLMPC 控制时，系统频率、机组转速以及有功功率的变化情况，仿真结果如图 14 所示。计算系统频率变化量与转速差值的 RMS 值，如表 5 所示。

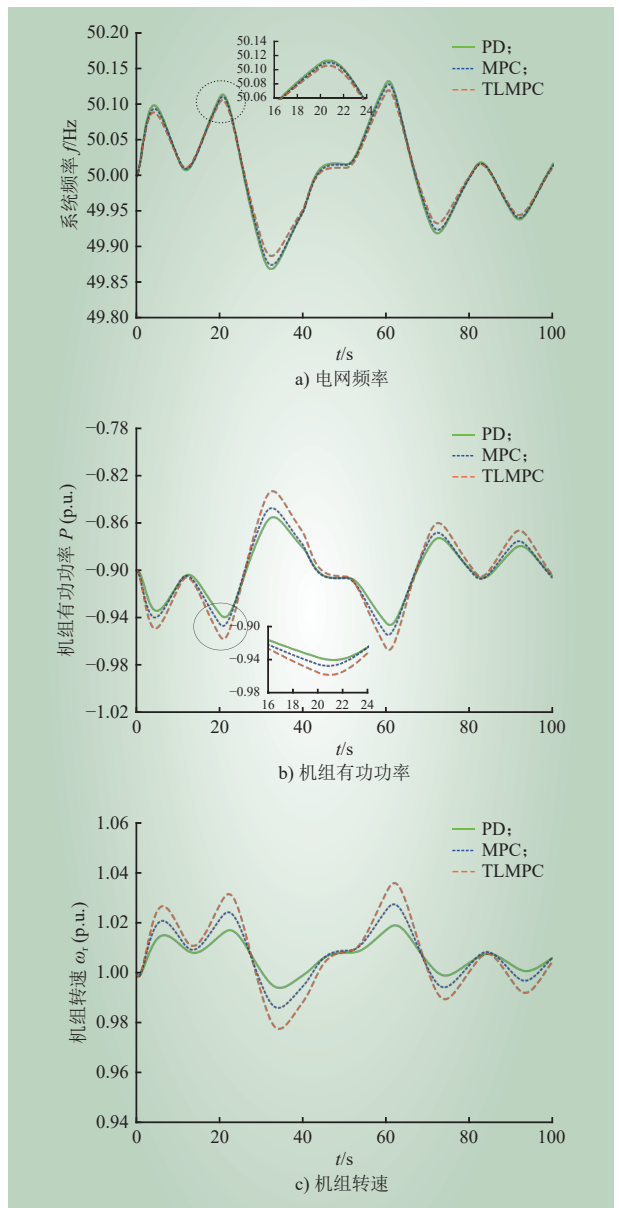


图 14 电动工况仿真结果

Fig. 14 Simulation results of pump condition

表 5 电动工况系统频率差与转速差的 RMS 值
Table 5 RMS values of system frequency difference and speed difference under pump condition

控制策略	$R_{MS\Delta f}$	$R_{MS\Delta\omega r}$
PD	0.065 0	0.008 2
MPC	0.006 2	0.007 8
TLMPC	0.005 7	0.008 0

由图 14 可以看出，在电动工况下，采用 MPC 和 TLMPC 的虚拟惯量控制时系统频率差和转速差的 RMS 值均小于传统的 PD 控制。采用 TLMPC 的虚拟惯量控制时系统频率差的 RMS 值同样小于单层 MPC 虚拟惯量控制，虽然转速差的 RMS 值相比单层 MPC 的转速差值略有增加，但仍在安全范围内。因此，在电动工况下，TLMPC 虚拟惯量控制策略同样可以兼顾系统频率恢复和机组转速恢复。为说明本文所提方法在不同程度扰动下控制响应的优势，上述仿真有意将系统惯量设置偏小，以便在相同的扰动下模拟出较大的系统频率幅度变化。

5 结语

本文提出了全功率变速抽水蓄能机组双层 MPC 虚拟惯量控制策略。标准层 MPC 基于确定的系统预测模型，产生最小化的频率偏差信号，传递给辅助层 MPC，而辅助层 MPC 考虑光伏的随机性，以跟踪标准层 MPC 预测的频率偏差为目标，同时产生功率和导叶控制信号。仿真结果表明，相比于 MPC、PD 控制策略，本文所提出的全功率抽水蓄能机组双层 MPC 虚拟惯量控制策略能更好消纳光伏的不确定性功率波动，在改善系统频率的同时，兼顾机组转速恢复，保证机组在安全范围内运行。未来可考虑将所提方法拓展应用于多抽蓄机组协调控制问题。

参考文献：

[1] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 1–8, 25.
LIU Jizhen. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency[J]. Proceedings of the CSEE,

2013, 33(16): 1–8, 25.
[2] 付红军, 陈惠粉, 赵华, 等. 高渗透率下风电的调频技术研究综述 [J]. 中国电力, 2021, 54(1): 104–115.
FU Hongjun, CHEN Huifen, ZHAO Hua, *et al.* Review on frequency regulation technology with high wind power penetration[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 104–115.
[3] 徐秋实, 施通勤, 井浩然, 等. 面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 128–137.
XU Qiushi, SHI Tongqin, JING Haoran, *et al.* Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 128–137.
[4] HOFFSTAEDT J P, TRUIJEN D P K, FAHLBECK J, *et al.* Low-head pumped hydro storage: a review of applicable technologies for design, grid integration, control and modelling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112119.
[5] KALDELLIS J K, ZAFIRAKIS D, KAVADIAS K. Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 378–392.
[6] 裴哲义, 元博, 宗瑾, 等. 定、变速抽水蓄能机组调度决策关键技术研究 [J]. 水力发电, 2018, 44(4): 86–91.
PEI Zheyi, YUAN Bo, ZONG Jin, *et al.* Research on key dispatching technique of fixed-speed and variable-speed pumped-storage units[J]. Water Power, 2018, 44(4): 86–91.
[7] FREDERIK M J, LUKAS M, JAKOB S, *et al.* Nonlinear model predictive control of a variable-speed pumped-storage power plant[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019: 1–16.
[8] 刘彬彬, 杨健维, 廖凯, 等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 17–22.
LIU Binbin, YANG Jianwei, LIAO Kai, *et al.* Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(16): 17–22.
[9] 王玥瑶, 延肖何, 刘念. 多交易模式下混合式抽水蓄能电站优化调控策略 [J]. 南方电网技术, 2024, 18(5): 51–61.
WANG Yueyao, YAN Xiaohe, LIU Nian. Optimization scheduling strategy for hybrid pumped-storage power station under multi-transaction modes[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(5): 51–61.

- [10] 李辉, 王坤, 刘海涛, 等. 交流励磁抽水蓄能机组变下垂系数调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 68–73, 88.
- LI Hui, WANG Kun, LIU Haitao, *et al.* Variable droop coefficient frequency control strategy of AC excited pumped storage unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 68–73, 88.
- [11] 李颖颖, 王德林, 范林源, 等. 双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2910–2917.
- LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, *et al.* Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2910–2917.
- [12] 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.
- [13] 赵书强, 王子巍, 李志伟, 等. 分布式光伏-抽蓄系统联合优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(11): 76–86.
- ZHAO Shuqiang, WANG Ziwei, LI Zhiwei, *et al.* Joint Optimal operation strategy of distributed photovoltaic-pumped storage systems[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(11): 76–86.
- [14] 胡万丰, 樊红刚, 王正伟. 双馈式抽水蓄能机组功率调节仿真与控制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 591–600.
- HU Wanfeng, FAN Honggang, WANG Zhengwei. Simulated power control for doubly-fed pumped storage units[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(6): 591–600.
- [15] 畅欣, 韩民晓, 郑超. 全功率变流器可变速抽水蓄能机组的功率调节特性分析[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 91–97.
- CHANG Xin, HAN Minxiao, ZHENG Chao. Power regulation characteristics analysis of variable speed pumped storage with full-size converter[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 91–97.
- [16] 衣传宝, 梁廷婷, 汪卫平, 等. 全功率变速抽水蓄能机组无功优先控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(1): 25–31.
- YI Chuanbao, LIANG Tingting, WANG Weiping, *et al.* Study on reactive power priority control strategy of variable speed pumped storage unit with full-sized converter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(1): 25–31.
- [17] 史华勃, 王渝红, 滕予非, 等. 全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 162–169.
- SHI Huabo, WANG Yuhong, TENG Yufei, *et al.* Small signal modeling of variable-speed pumped storage unit with full-size converter in fast-power mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 162–169.
- [18] TIWARI R, NILSEN R, MO O. Control strategies for variable speed operation of pumped storage plants with full-size converter fed synchronous machines[C]//2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2021.
- [19] 丁理杰, 史华勃, 陈刚, 等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(3): 166–171, 179.
- DING Lijie, SHI Huabo, CHEN Gang, *et al.* Control strategy and regulation characteristics of variable speed pumped storage unit with full-size converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(3): 166–171, 179.
- [20] 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.
- [21] LIANG J Q, HARLEY R G. Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN. IEEE, 2010: 1–8.
- [22] 刘开培, 朱蜀, 冯欣, 等. 双馈式变速抽水蓄能电厂的机电暂态建模及模型预测控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2407–2418.
- LIU Kaipei, ZHU Shu, FENG Xin, *et al.* Electromechanical transient modeling and model predictive control of doubly-fed variable-speed pumped storage power plant[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2407–2418.
- [23] 井浩然, 李佳, 赵红生, 等. 双馈变速抽水蓄能全工况转换过程建模与仿真[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 41–50.
- JING Haoran, LI Jia, ZHAO Hongsheng, *et al.* Modeling and simulation of operating condition conversion of doubly-fed variable speed pumped storage[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 41–50.
- [24] 井浩然, 施通勤, 徐秋实, 等. 风电场与多分布式变速抽水蓄能协同调频控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 125–135.
- JING Haoran, SHI Tongqin, XU Qiushi, *et al.* Coordinated frequency modulation control of a wind farm and multi-distributed variable speed pumped storage[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 125–135.
- [25] 汪哲铖, 杨威嘉, 杨小龙, 等. 变速抽水蓄能机组功率优先控制模式的运行稳定域分析[J]. 水电与抽水蓄能, 2024, 10(1): 24–29, 92.

WANG Zhecheng, YANG Weijia, YANG Xiaolong, *et al.*
Analysis of frequency stability regions under power fast mode in
variable speed pumped storage plants[J]. Hydropower and Pumped
Storage, 2024, 10(1): 24–29, 92.

作者简介:

许常昊(2001), 男, 硕士研究生, 从事全功率抽水
蓄能机组控制等研究, E-mail: xchao@cau.edu.cn;

关伟东(2000), 男, 硕士研究生, 从事双馈型变速
抽水蓄能机组控制等研究, E-mail: s20223081628@cau.edu.cn;

王越(1982), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师,
从事电力系统运行可靠性评估与风险决策等研究, E-mail:
wyue@cau.edu.cn。

(责任编辑 李博)

Two-Layer MPC Virtual Inertia Control Strategy for Small-Scale Variable-Speed Pumped Storage Unit with Full-Size Converter

XU Changhao¹, GUAN Weidong¹, WANG Yue¹, ZHANG Jinshuai²,
WANG Peng², ZHOU Ning², SHANG Bowen²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China; 2. State Grid Henan Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: The development of miniature variable-speed pumped storage on the distribution side is conducive to enhancing the ability of the distribution network to accommodate renewable energies in a more environmentally friendly way. In this paper, a two-layer model predictive control (MPC) virtual inertia control strategy for variable-speed pumped storage unit with full-size converter is proposed. The strategy contains a standard-layer MPC and an auxiliary-layer MPC. The standard-layer MPC generates minimized frequency deviation signals based on a determined system prediction model and passes them to the auxiliary-layer MPC, which considers the stochastic nature of the PV generation with the goal of tracking the frequency deviation predicted by the standard-layer MPC and generates both the power and the guide vane control signals. The simulation of a test system containing a pumped storage unit with full-size converter shows that the proposed control strategy has good frequency-regulating performance, which is helpful to enhancing the PV accommodation capability of the distribution networks.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (Research and Equipment Development of Key Technologies for Micro Pumped Storage for distributed New Energy Consumption in Distribution Networks, No.5400-202324196A-1-1-ZN).

Keywords: variable-speed pumped storage unit; full-size converter; virtual inertia control; frequency control; model predictive control