

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211524

含风电的双馈抽水蓄能机组协调调频策略

罗远翔, 李鑫明, 潘超, 关明

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 双馈抽水蓄能机组解耦控制使得其转子无法响应系统频率变化。为提高双馈抽水蓄能机组参与系统调频能力, 提出一种转子动能与导叶开度协调控制的控制策略。首先建立水泵水轮机和双馈发电机的数学模型, 分析双馈抽水蓄能机组进行导叶开度寻优的过程。其次在水泵水轮机的导叶开度控制中加入频率控制环节, 同时根据机组可用转子动能整定可变调差系数, 确保机组转速始终运行在安全范围内。最后结合两种控制的调频优势, 依据频率变化协调两种控制参与调频的比例系数, 实现二者平滑切换。在含风机的系统中仿真分析, 结果表明所提控制策略在抽水蓄能机组发电、电动工况下均能够提高机组频率响应能力和电网的风电消纳能力。

关键词: 双馈抽水蓄能; 转子动能; 导叶开度; 比例系数; 频率调节

Coordinated frequency modulation strategy of doubly fed pumped storage units with wind power

LUO Yuanxiang, LI Xinming, PAN Chao, GUAN Ming

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: The decoupling control of a doubly fed pumped storage unit makes its rotor unable to respond to a change of system frequency. To improve the ability of the storage unit to participate in system frequency modulation, a control strategy of coordinated control of rotor kinetic energy and guide vane opening is proposed. First, the mathematical models of pump turbine and doubly fed generator are established, and the optimization process of guide vane opening of the storage unit is analyzed. Secondly, the frequency control link is added to the guide vane opening control of the pump turbine, and the variable difference adjustment coefficient is set according to the available rotor kinetic energy of the unit. This ensures that the unit speed always operates within the safe range. Finally, combined with the frequency modulation advantages of the two controls, the proportional coefficients of the two controls participating in frequency modulation are coordinated according to the frequency change, so as to realize smooth switching between the two. In the system with wind turbine, the simulation results show that the proposed control strategy can improve the frequency response capacity of the unit and the wind power consumption capacity of the power grid under the power generation and electric conditions of the pumped storage unit.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: doubly fed pumped storage; rotor kinetic energy; guide vane opening; scale factor; frequency regulation

0 引言

我国已把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局, 将加快向以新能源为主体的新型电力系统转变, 而新能源的波动性使得电网安全稳定运行面临巨大挑战^[1-6]。抽水蓄能电站是电力系统中技术成熟、运行可靠且较为经济的主要调节电源, 可有效促进大规模风电和光伏发电的入网消纳, 在电网中

承担调峰、调频、调相、储能、系统备用和黑启动等功能, 对提高电网稳定性、促进新能源消纳、减少能源消耗具有重要意义^[7-9]。加快发展抽水蓄能电站, 能够提升电力系统灵活性、经济性和安全性, 推动以新能源为主体的新型电力系统的快速发展, 在保证供电稳定性、确保电网安全、提高新能源利用率、推动能源绿色低碳转型中起到重要作用。双馈抽水蓄能机组(Doubly Fed Pumped Storage Unit, DFPSU)转速可调, 采用双馈电机作为发电电动机, 其出力响应迅速, 调节方式灵活, 在电网频率调节

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助(2016YFB0900100)

中起到重要作用^[10]。

常规抽水蓄能机组只能在恒速恒频方式下运行, 因此其运行工况决定于水头和负荷。水泵水轮机的最优转速需要考虑水泵运行工况和水轮机运行工况的效率, 综合得到最优运行效率, 所以转速通常只能偏离两者的最高效率点。DFPSU 转速可根据运行水头与负荷相应地进行调节, 使水泵水轮机始终运行在效率最高点附近, 有效提高运行效率, 扩大电动工况和发电工况的运行范围^[11]。DFPSU 变速运行, 能够释放或吸收转子动能进行快速功率调节, 可以等效出比固有惯量更大的惯量^[12], 因此成为调节系统频率、平衡新能源出力波动的有效手段^[13]。

目前, 国内外主要研究 DFPSU 的机组建模和参数优化分析。文献[14-15]对 DFPSU 电气系统进行建模, 研究机组动态模型和机电暂态模型对仿真结果的影响, 分析机组变速对水泵水轮机效率的影响。文献[16-18]分析了水泵水轮机中调速器参数、输水管道模型的变化对于系统参数的影响。对于双馈风电机组调频控制策略得到了广泛研究^[19-20]。文献[21-24]提出利用机组转子动能响应系统频率变化, 通过附加频率控制环节来释放或吸收转子动能, 能够模拟与同步发电机相似的惯性响应, 快速改变机组输出的有功功率, 进而为系统提供功率支撑。文献[25-27]提出采用下垂控制策略实现对系统频率的控制, 根据风速变化和机组减载实现变下垂系数控制。但 DFPSU 运行工况更加复杂多变, 涉及 DFPSU 频率控制方面的研究还处于起步阶段。文献[28]提出基于惯性环节的变下垂系数控制方式, 根据频率变化率实时调整下垂系数。文献[29]在 DFPSU 转速控制和导叶开度控制中加入频率控制环节, 使水泵水轮机能够响应频率波动。上述文献中 DFPSU 参与电网频率调节的控制策略延续了双馈风电机组转子动能控制策略, 通过转子动能控制对发电机电磁转矩的快速控制, 释放或吸收转子存储的动能, 改变机组出力达到调频目的, 其响应速度快, 但不能长时间提供, 否则会导致机组转速超出允许范围。而且通常只考虑双馈机组运行在发电工况下的特性, 缺少对电动工况下调频控制策略的研究。因此, 为提高 DFPSU 参与系统调频的能力, 需要结合水泵水轮机的导叶开度对频率调节的作用, 考虑电动工况下的运行特点, 进一步研究有效的 DFPSU 参与调频的控制策略。

本文针对转子动能与导叶开度调频的特点与不足, 结合调频过程中系统频率变化的特征, 提出一种转子动能与导叶开度协调控制的控制策略。在惯性响应阶段利用 DFPSU 的转子动能快速响应频率

改变机组出力, 通过整定可变调差系数确保机组转速处于安全范围内; 在频率恢复阶段, 控制导叶开度响应系统频率变化, 将电网频率变化量整定为导叶开度的控制量, 提供持久的有功支撑; 根据频率变化调节两种控制策略参与调频的比例系数, 实现两者的优势互补和平滑切换, 避免直接切换时对系统造成冲击。通过仿真验证了本文所提策略在发电、电动工况下的有效性。

1 DFPSU 模型及控制

1.1 水泵水轮机模型

水泵水轮机的模型主要包括转速与导叶开度优化器、调速器、输水管道及水泵水轮机模型。发电工况下水泵水轮机运行在水轮机模式, 其数学模型为^[18]

$$\begin{cases} H = \left(\frac{Q}{y}\right)^2 \\ dH = f_c Q^2 \\ Q = \frac{H_s - H - dH}{T_w} \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为有效水头; Q 为输水管道中的流量; y 为水泵水轮机的导叶开度; dH 为损失水头; f_c 为损失系数; H_s 为从上水库到水泵水轮机入口的静态水头; T_w 为水流惯性时间常数。

电动工况下, 水泵水轮机运行在水泵模式, 此时机组运行点取决于水泵特性曲线 h_d-Q 和管路特性曲线 $h-Q$ 的交点, 即

$$\begin{cases} h_d = a\omega_r^2 - b\omega_r Q - cQ^2 \\ h = h_s + dh = h_s + f_c Q^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: h_d 为扬程; a 、 b 、 c 为曲线拟合系数; ω_r 为水泵转速; h 为水泵运行所需要的总扬程; h_s 和 dh 为静态扬程和损失扬程。

图 1 为传统综合惯性控制的 DFPSU 的控制结构图, 根据系统频率变化整定得到有功增量, 改变机侧有功功率参考值, 快速调节转子动能实现对电网频率调节, 数学表达式为式(3)。

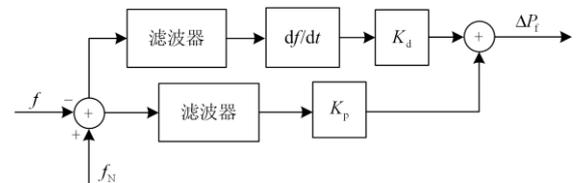


图 1 传统控制下的 DFPSU 控制结构

Fig. 1 DFPSU control structure under traditional control

$$\Delta P_f = \Delta P_{f1} + \Delta P_{f2} = K_p \Delta f + K_d \frac{df}{dt} \quad (3)$$

图 1 和式(3)中: f_N 和 f 分别为额定频率和系统频率; K_d 为惯性控制系数; K_p 为下垂控制系数。

1.2 导叶开度寻优控制

为使水泵水轮机在不同水头和出力要求下能够始终运行在最高效率附近并实现快速功率响应, 机组根据水泵水轮机效率特性曲线进行导叶开度寻优控制, 通过调节导叶开度控制水泵水轮机出力, 机组能够在 1 s 内改变出力^[30]。

DFPSU 运行在发电工况时, 首先根据机组给定的有功功率 P_{ref} 和实时水头 H_{ref} 计算出水泵水轮机的单位出力 p_1 , 如式(4)所示。

$$p_1 = \frac{P_{ref}}{D^2 H_{ref}^{3/2} \eta_t} \quad (4)$$

式中: D 为水泵水轮机的转轮直径; η_t 为 DFPSU 发电工况下的发电效率。由水轮机最优出力曲线 $p_{1max} = f_1(Q) = 9.81Q\eta_{tmax}$ 和最高效率曲线 $\eta_{tmax} = f_2(Q)$ 得到 p_1 、 Q 、 η_{tmax} ; 根据效率峰顶曲线 $n_r = f_3(Q)|_{\eta_t=\eta_{tmax}}$ 计算对应的最优单位转速 n_1 ; 由 $n_r = n_1 \sqrt{H} / D$ 计算得到电机最优转速 n_{ref} ; 根据最优转速 n_{ref} 和机组转速 n 经水轮机调速器得到最优导叶开度 y_0 , 调节 DFPSU 保证最优效率运行。控制框图如图 2 所示。

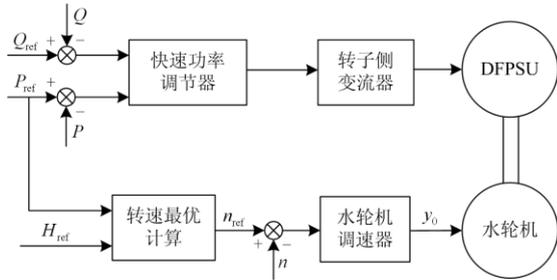


图 2 发电工况下 DFPSU 控制流程图

Fig. 2 DFPSU control flow chart under generation condition

在电动工况下: 由给定的机组负荷 P_{ref} 和扬程 h_{ref} 得到水泵 $Q-\eta_p$ 函数 $Q = f_4(\eta_p)$, η_p 为 DFPSU 电动工况下的效率; 由水泵管路特性 $h_{need}-Q$ 曲线和函数 f_4 得到水泵 η_p-y 函数 $\eta_p = f_5(y)$, y 为导叶开度; 对函数 f_5 求偏导, 得 $\eta_p = \eta_{pmax}$ 时导叶开度 y_{ref} ; 根据 y_{ref} 经机械导叶调节得到水泵最优导叶开度 y_0 , 调节 DFPSU 保证最优效率运行。控制框图如图 3 所示。

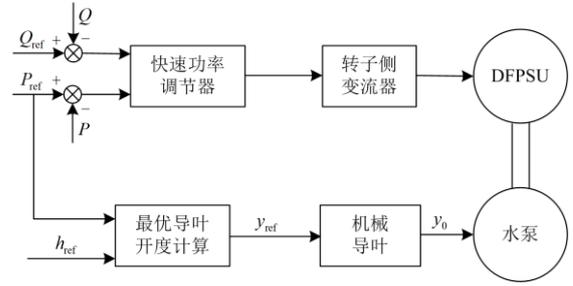


图 3 电动工况下 DFPSU 控制流程图

Fig. 3 DFPSU control flow chart under electric condition

DFPSU 广泛使用等效单管单机模型, 引水系统采用刚性水击模型, 则水泵水轮机及其调节系统理想工况下可描述为

$$\begin{cases} y = \frac{1}{T_y s + 1} (y_0 + v) \\ P_m = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} y \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_y 为随动系统时间常数; T_w 为水流惯性时间常数; P_m 为抽水蓄能机组机械功率; y 、 y_0 分别为导叶开度和最优导叶开度; v 为导叶开度控制量; s 为拉氏变换因子。

式(5)经过拉普拉斯反变换, 得到:

$$\begin{cases} \dot{y} = \frac{1}{T_y} (-y + y_0 + v) \\ \dot{P}_m = \frac{2}{T_w} (-P_m + y - T_w \dot{y}) \end{cases} \quad (6)$$

发电机的转子运动方程为^[31]

$$2H_t \dot{\omega} = P_m - \frac{P_e}{S_h} - D\omega \quad (7)$$

式中: H_t 为机组惯性时间常数; ω 为机组转速; P_e 为抽水蓄能机组电磁功率; S_h 为抽水蓄能机组功率基准值与电网功率基准值之比; D 为阻尼系数。

由式(6)和式(7)得到 DFPSU 增量式状态方程。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P}_m \\ \Delta \dot{y} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{T_w} & \frac{2}{T_w} + \frac{2}{T_y} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_y} & 0 \\ \frac{1}{2H_t} & 0 & -\frac{D}{2H_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta y \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{2}{T_y} & 0 \\ \frac{1}{T_y} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2H_t S_h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta P_e \end{bmatrix} \quad (8)$$

状态变量选为 ΔP_m 、 Δy 、 $\Delta \omega$ ，方程的输入变量为 Δv 、 ΔP_e ，则将 DFPSU 状态方程写为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta v + \mathbf{C}\Delta P_e \quad (9)$$

式中：导叶开度控制变化量 Δv 为系统输入扰动；机组电磁功率变化量 ΔP_e 为输出。对于不同水头和出力要求，两种工况均可通过调整水泵水轮机的导叶开度改变 DFPSU 的出力。因此可通过控制水泵水轮机导叶开度响应系统频率波动，其调频功率稳定，但需要机械动作改变导叶开度，响应频率变化的速度较慢。

1.3 DFPSU 惯量分析

对于同步发电机组，忽略阻尼作用，转子中存储的旋转动能 E 为^[32]

$$E = \frac{1}{2} J \omega_e^2 \quad (10)$$

式中： J 为发电机转动惯量； ω_e 为同步角速度。发电机通过控制转速变化释放或吸收转子动能，达到改变机组出力的目的。DFPSU 功率解耦控制使得转速不能跟随频率变化做出快速响应，通过在机侧变流器中增加频率控制环节，利用转子中大量可供调频的转子动能改变机组出力，可模拟同步发电机的频率响应特性。

当电网频率变化时，系统进行调速，电机的动能变化为

$$\Delta E_D = \frac{1}{2} J_D [(\omega_{r0} + \Delta \omega_r)^2 - \omega_{r0}^2] = \frac{1}{2} J_S [(\omega_e + \Delta \omega_e)^2 - \omega_e^2] \quad (11)$$

式中： J_D 为 DFPSU 的转动惯量； J_S 为 DFPSU 的虚拟转动惯量； ω_e 、 $\Delta \omega_e$ 为系统同步角速度及系统同步角速度增量； ω_{r0} 、 $\Delta \omega_r$ 分别为 DFPSU 初始角速度及角速度增量。由式(11)可得 DFPSU 机组对于电网频率变化虚拟出的等效惯量为

$$J_S = \frac{J_D [(\omega_{r0} + \Delta \omega_r)^2 - \omega_{r0}^2]}{[(\omega_e + \Delta \omega_e)^2 - \omega_e^2]} \approx \frac{J_D \omega_{r0} \Delta \omega_r}{2\pi \omega_e \Delta f} \quad (12)$$

式中， Δf 为系统频率变化量。

由式(12)可知，DFPSU 的虚拟惯量除和自身的固有惯量有关外，还取决于 ω_{r0} 、 $\Delta \omega_r$ 和 Δf 。因此，与同步发电机组不同，DFPSU 可以通过转速调节等效出比自身固有惯量更大的虚拟惯量。

2 协调调频控制策略

以发电量减少引起系统频率降低为例，电力系统频率响应如图 4 所示。在系统的惯性响应作用下频率下降到最低点 B 点，惯性响应是发电机对频率

变化所表现出的暂态响应特性，此时同步发电机组的调速系统将作用于原动机，增加或减少发电机的出力，可有效抑制电网频率变化。频率由最低点恢复到 C 点，此时频率恢复阶段表现出静态响应特性，机组将根据电网的频率偏差自动调节其功率，从而减小系统稳态频率偏差，使系统频率达到新的稳态。

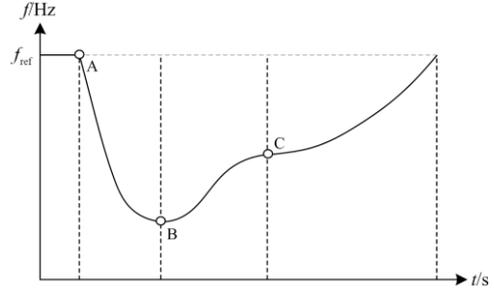


图 4 频率响应

Fig. 4 Frequency response

DFPSU 参与调频的协调控制结构如图 5 所示。根据当前水头 H (或扬程 h_d) 和给定功率 P 拟合得到最优导叶开度 y_0 ，为使水泵水轮机能够响应频率变化及时改变出力情况，在最优导叶开度控制的基础上增加频率响应控制环节得到 Δy ，最终得到水泵水轮机导叶开度值 y_{ref} 。利用 DFPSU 转子中可用的转子动能，根据整定的可变调差系数 R 快速调节机组有功输出，从而分担电网有功功率的突变，使 DFPSU 对系统惯性具有更多的支持能力， K_3 为增益值。图中 K_1 、 K_2 分别为转子动能控制和导叶开度控制的比例系数，转子动能不能长时间提供，否则会使机组转速超出安全范围，而导叶开度控制涉及机械动作响应速度慢，因此通过比例系数根据频率变化自动调整两种控制参与调频的比例。

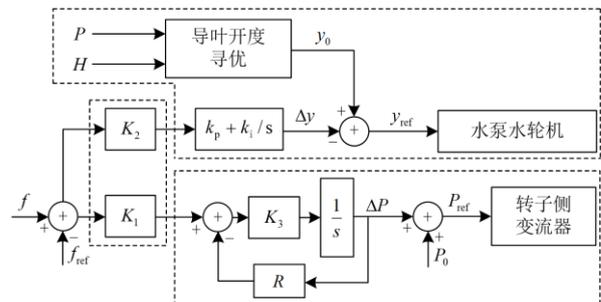


图 5 DFPSU 参与调频的协调控制结构

Fig. 5 Coordinated control structure of DFPSU participating in frequency modulation

2.1 转子动能控制

通过释放或存储 DFPSU 的转子动能，快速响应频率波动改变机组出力，支撑电网频率恢复。但

转子中可用的旋转动能为暂态能量, 通过存储或吸收转子动能只能短暂改变机组出力, 不能长时间提供稳定出力, 否则会导致机组转速超出允许范围。

DFPSU 能够变速运行, 且具有较大的转速变化范围, 通过调节转速释放或吸收转子动能, 转子转速改变时释放的动能为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (13)$$

式中: 转子转速由 ω_1 变化至 ω_2 ; J 为转动惯量。可将 DFPSU 存储的动能换算成特定调频时间下的调频功率^[22], 如式(14)所示。

$$\Delta P_D = \eta \frac{J}{2\Delta t} (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (14)$$

式中: ΔP_D 为惯性响应的调频功率; η 为动能转化至电能的转换效率; Δt 为惯性响应持续时间, 一般设定为 10 s。当吸收转子动能时, ω_2 取 ω_{\max} 即转子转速最大值 1.25 p.u., ω_1 取 ω_r 即 DFPSU 转子转速; 当释放转子动能时, ω_1 取 ω_{\min} 即转子转速最小值 0.7 p.u., ω_2 取 ω_r 即 DFPSU 转子转速。

整定 DFPSU 的可变调差系数为

$$R = -\frac{\Delta f_D}{\Delta P_D} \quad (15)$$

式中, Δf_D 为 DFPSU 响应频率变化的临界值。调差系数 R 并不是固定值, 可以根据当前机组可释放或吸收动能大小实时地动态变化, 从而决定机组调频功率的多少, 可避免机组转速超出安全范围。

2.2 导叶开度控制

水泵水轮机的导叶开度控制调频, 能够提供稳定的调频功率, 持久稳定地改变机组出力, 但由于需要机械动作改变导叶开度, 因此频率响应速度较慢。系统频率出现偏差时, 通过在水泵水轮机的导叶开度控制中加入频率控制环节, 将电网频率偏差整定为导叶开度的附加指令, 调节水泵水轮机导叶开度, 实现水泵水轮机参与电网的频率调节。基于系统频率偏差, 通过 PI 控制得到导叶开度控制量, 调节水泵水轮机导叶开度, 通过改变水泵水轮机输出的机械力矩调整机组的输出功率, 提供更加稳定的功率支撑。

为使导叶开度响应系统频率波动进而改变水泵水轮机出力, 为导叶开度增加频率控制环^[29]。

$$y_{\text{ref}} = y_0 - \Delta y = y_0 - (k_p + k_i \frac{1}{s}) \Delta f \quad (16)$$

式中: y_{ref} 为导叶开度指令; y_0 为机组不参与调频时根据给定功率和水头拟合得到的最优导叶开度;

Δy 为频率控制环节输出的导叶开度控制量; k_p 和 k_i 分别为频率控制环节的比例和积分系数。

2.3 比例系数模型

统筹考虑转子动能与导叶开度控制在调频过程中的特点, 提出一种确定二者参与调频的比例系数模型。此模型中比例系数 K 随频率变化率的变化而调整, 发挥二者的调频优势并实现两种控制策略的平滑切换。

本文通过采用双曲正切函数确定两种调频策略参与调频的比例系数。双曲正切函数单调性、凹凸性及有界性的性质, 符合比例系数 K 随频率变化率变化的自适应性, 能够实现两种控制策略的平滑切换。即在惯性响应阶段, 转子动能控制起主要调频作用, 快速响应频率变化; 在频率恢复阶段, 导叶开度控制起主要调频作用, 稳定改变机组出力, 减小稳态误差, 实现二者在响应与支撑时间上的互补关系。系统频率突然下降时比例系数模型为

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{1 + \exp[n(df/dt)]} \\ K_2 = \frac{\exp[n(df/dt)]}{1 + \exp[n(df/dt)]} \end{cases} \quad (17)$$

式中: K_1 、 K_2 分别为转子动能控制和导叶开度控制的比例系数; n 为自适应系数。

系统频率下降, K_1 在 $df/dt < 0$ 时由 1 先慢后快减小至 0.5, K_2 在此阶段由 0 增大至 0.5, 此阶段转子动能控制主导 DFPSU 改变出力, 快速响应频率变化。 $df/dt > 0$ 时, K_1 由 0.5 快速减小至 0, K_2 由 0.5 快速增加至 1, 此阶段导叶开度主导 DFPSU 改变出力, 稳定改变机组出力, 减小稳态误差。在调频过程中始终保证 $K_1 + K_2 = 1$, 两个比例系数均为平滑曲线, 实现控制策略的平滑切换。同理, 可以得到系统频率突然上升时比例系数模型为

$$\begin{cases} K_1 = \frac{\exp[n(df/dt)]}{1 + \exp[n(df/dt)]} \\ K_2 = \frac{1}{1 + \exp[n(df/dt)]} \end{cases} \quad (18)$$

自适应系数 n 取值不同时, 比例系数 K_1 、 K_2 的变化曲线如图 6 所示, 图中 n 分别取 20、30、40、50、80。可以看到 n 较大时, 比例系数仅在很小的一段范围内随 df/dt 有较大变化; n 值较小时, df/dt 略有变化时比例系数变化幅度较大, n 较大或较小都难以发挥两种调频策略响应频率变化优势, n 取中间值 40。

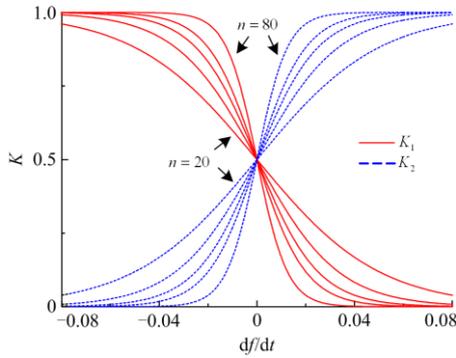


图 6 不同 n 值的比例系数曲线

Fig. 6 Proportional coefficient curves with different n values

3 仿真分析

为验证本文所提控制策略对频率控制的有效性, 以东北某实际电网数据为基础, 建立如图 7 所示的含抽水蓄能机组的 4 机 2 区仿真系统。其中: G_1 、 G_3 为容量为 400 MW 的火电厂; G_4 为容量为 1000 MW 的火电厂; G_2 为容量为 280 MW 的抽水蓄能机组; G_5 为容量为 300 MW 的风电机组; L_1 和 L_2 分别是容量为 700 MW 和 1000 MW 的有功负荷。

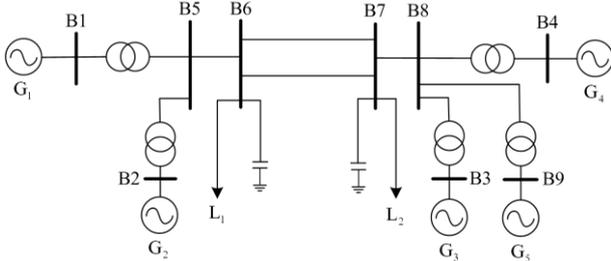


图 7 仿真系统结构图

Fig. 7 Simulation system diagram

为对比分析本文所提策略在发电工况和电动工况下的有效性, 对于系统中产生的波动, 采用本文转子动能与导叶开度协调控制策略、图 1 所示的传统综合惯性控制策略和无附加控制策略 3 种控制策略, 仿真分析在两种工况下, 不同控制方式下的频率响应。

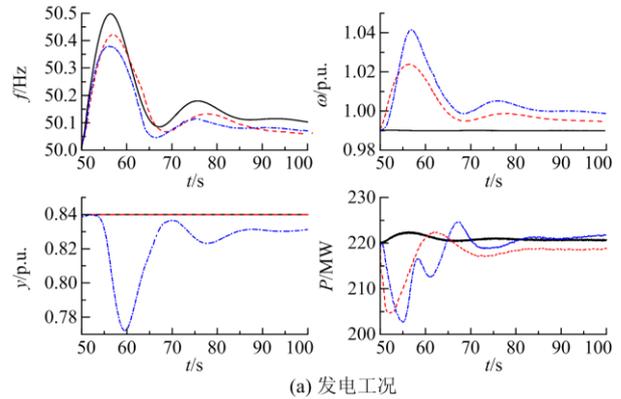
3.1 负荷突减时的仿真分析

负荷 L_2 在 50 s 时由 1000 MW 突减到 900 MW, 风速保持恒定, 仿真分析本文控制策略与传统控制策略下, DFPSU 分别运行在发电、电动工况下系统的频率响应特性。仿真结果如图 8 所示。

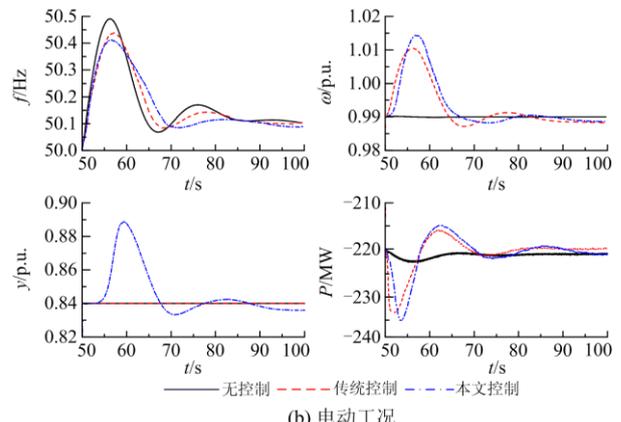
从图 8 中可以看出, 无附加控制的情况下频率变化速度和最大频率偏差最大, DFPSU 在发电、电动工况下均可以参与系统频率调节。传统惯性控制能在一定程度上抑制频率的最大偏差, 对比传统惯

性控制, 本文控制策略在两种工况下均减小了频率最大偏差, 在发电工况下减小了 0.052 Hz, 在电动工况下减小了 0.037 Hz。本文控制策略在两种工况下均缩短了系统频率恢复时间: 在发电工况下缩短了约 10 s, 约 30 s 恢复频率稳定; 在电动工况下缩短了约 12 s, 约 25 s 恢复频率稳定。导叶开度 y 在本文控制策略下得到调节。图 9 为风电出力变化, 在本文控制策略下风电出力波动较小, 降低了风电所需分担系统突变功率的比例, 可以减小风机减载备用容量。

在本文控制策略下, 机组转速与出力的变化幅度较传统综合惯性控制策略更大。这是因为本文策



(a) 发电工况



(b) 电动工况

图 8 负荷 L_2 突减 100 MW 时系统响应对比

Fig. 8 Comparison of system response when load L_2 suddenly decreases by 100 MW

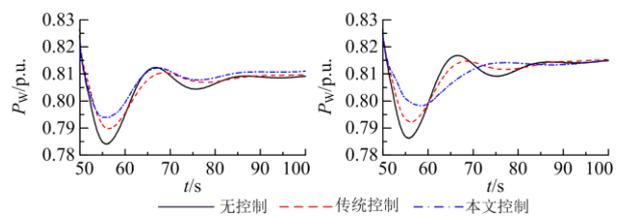


图 9 发电、电动工况下负荷突减的风电出力变化

Fig. 9 Change of wind power output with sudden load reduction under power generation and electric conditions

略一方面通过转子动能控制快速改变机组出力，同时可变的调差系数使转速运行在安全范围内，确保频率不会出现二次跌落；另一方面加入导叶开度控制，能够提供更加稳定、变化幅值更大的出力，支撑系统频率快速恢复稳定值，而传统控制仅通过释放转子中存储的能量改变机组出力。比例系数调节实现转子动能控制与导叶开度控制在响应与支撑时间上互补，并实现两者平滑切换，避免了直接切换使 DFPSU 出现较大的功率跃变，因此从图中可以看出本文控制策略下机组的出力和转速曲线较为平滑，有效地避免了控制策略切换产生功率突变对电网产生冲击，显著提高了系统的频率稳定性。

3.2 负荷突增时的仿真分析

负荷 L_2 在 50 s 时由 1000 MW 突增到 1100 MW，风速保持恒定，仿真分析本文控制策略与传统控制策略下，DFPSU 分别运行在发电、电动工况下系统的频率响应特性。仿真结果如图 10 所示。

从图 10 中可以看出，无附加控制的情况下频率变化速度和最大频率偏差最大，DFPSU 在发电、电

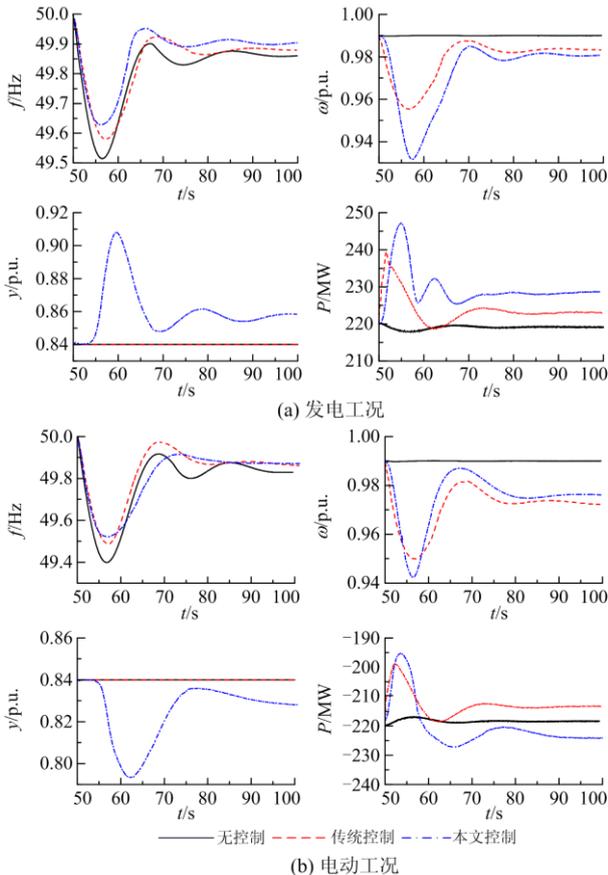


图 10 负荷 L_2 突增 100 MW 时系统响应对比
Fig. 10 Comparison of system response when load L_2 suddenly increases by 100 MW

动工况下均可以参与系统频率调节。传统惯性控制能在一定程度上抑制频率的最大偏差，对比传统惯性控制本文控制策略在两种工况下均减小了频率最大偏差，在发电工况下减小了 0.049 Hz，在电动工况下减小了 0.032 Hz。本文控制策略在两种工况下均缩短了系统频率恢复时间：在发电工况下缩短了约 8 s，约 25 s 恢复频率稳定；在电动工况下缩短了约 10 s，约 23 s 恢复频率稳定。在本文控制策略下，机组转速与出力的变化幅度较传统综合惯性控制策略更大，导叶开度得到调节，机组的出力和转速曲线较为平滑，有效地避免了控制策略切换产生功率突变对电网产生冲击。图 11 为风电出力变化，可以看出在本文控制策略下风电出力波动较小，降低了风电分担系统突变功率的比例。

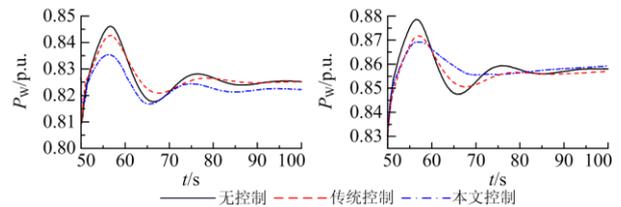


图 11 发电、电动工况下负荷突增的风电出力变化

Fig. 11 Change of wind power output with sudden increase of load under power generation and electric conditions

3.3 风速波动下的仿真分析

为验证本文所提出的协调控制策略对抑制风速变化扰动的有效性，风电机组 50 s 时出现风速波动，风速变化情况如图 12 所示。仿真分析本文控制策略与传统控制策略下，DFPSU 分别运行在发电、电动工况下系统的响应特性，仿真结果如图 13 所示。

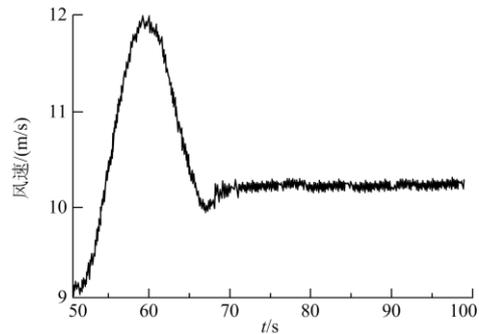


图 12 风速波动曲线

Fig. 12 Wind speed fluctuation curve

从图 13 中可以看出，无附加控制的情况下频率变化速度和最大频率偏差最大，DFPSU 在发电、电动工况下均可以参与系统频率调节。传统惯性控制能在一定程度上抑制频率的最大偏差，对比传统惯性控制，本文控制策略在两种工况下对于风速上升

与下降扰动均减小了频率最大偏差, 调频效果更好。在本文控制策略下, 机组转速与出力的变化幅度较传统综合惯性控制策略更大, 机组的出力和转速曲线较为平滑, 仅在风速变化方向改变即系统频率变化方向改变时出现波动, 但未出现系统出力突变的情况, 不会对系统产生冲击。

图 14 为发电、电动工况下风速波动时风电出力变化, 无附加控制下抑制风机输出有功功率变化, 风机损失部分风能。由于系统中 DFPSU 能够有效抑制风电对系统频率影响, 在本文控制策略下风机

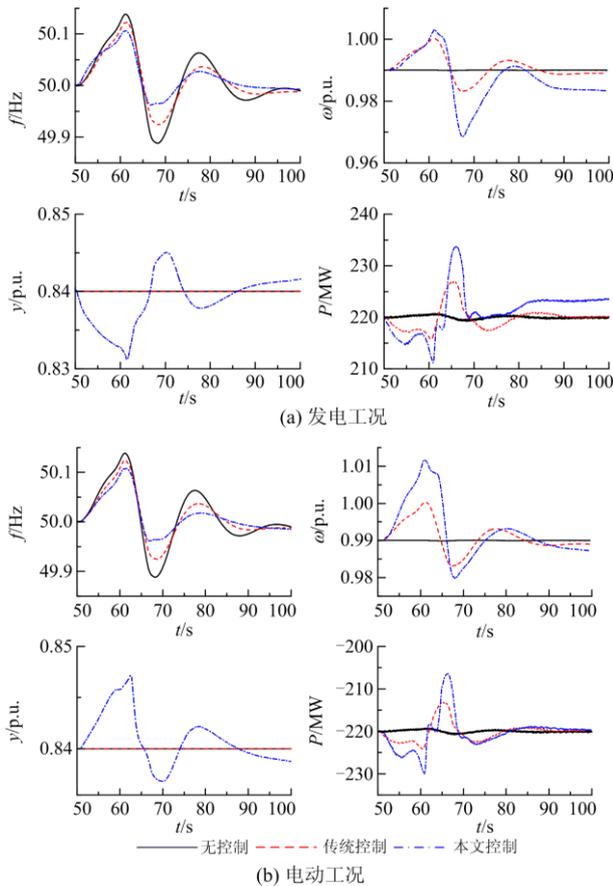


图 13 风速波动时系统响应对比

Fig. 13 Comparison of system response under wind speed fluctuation

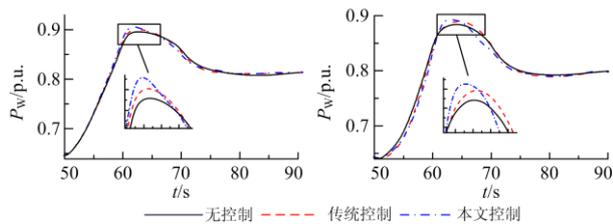


图 14 发电、电动工况下风速波动的风电出力变化

Fig. 14 Variation of wind power output under wind speed fluctuation under power generation and electric conditions

能较大程度随风速变化而改变输出功率, 能够在充分利用风能的同时保证频率波动最小, 提高风电消纳能力。

4 结论

综合 DFPSU 转子动能与导叶开度控制的优势, 本文提出一种转子动能与导叶开度控制协调的频率控制策略, 得出如下结论:

1) 系统发生阶跃扰动和风速连续扰动时, 此策略在发电工况与电动工况下能够有效抑制系统频率波动, 同时能够提高系统中风电消纳能力;

2) 通过判断当前机组可用转子动能, 实时调整调差系数 R , 改变机组调频出力深度, 保证 DFPSU 机组转速保持在安全范围的前提下, 能够快速响应频率波动;

3) DFPSU 可通过导叶开度控制响应系统频率波动, 根据系统频率偏差整定附加导叶开度, 为系统提供更稳定的出力, 有效减小频率偏差并缩短系统频率恢复稳定时间;

4) 调节两种控制方法参与调频的比例, 实现二者在响应与功率支撑时间互补, 实现转子动能控制与导叶开度控制之间的平滑切换, 避免控制方法切换时对系统产生冲击。

参考文献

- [1] 金晨, 任大伟, 肖晋宇, 等. 支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 164-174.
JIN Chen, REN Dawei, XIAO Jinyu, et al. Optimization planning on power system supply-grid-storage flexibility resource for supporting the "carbon neutrality" target of china[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 164-174.
- [2] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较[J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, et al. Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11.
- [3] 代琼丹, 邓昕, 吴雪妍, 等. 能源互联网下综合能源服务商业模式综述[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 135-144.
DAI Qiongdan, DENG Xin, WU Xueyan, et al. Overview on integrated energy service business model under energy internet[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 135-144.
- [4] 霍超, 李兆伟, 柯贤波, 等. 应对 UHVDC 送端电网新能源大规模脱网的频率紧急控制[J]. 电力工程技术,

- 2020, 39(4): 42-47,60.
- HUO Chao, LI Zhaowei, KE Xianbo, et al. Emergency frequency control for large-scale disconnection of renewable energy in the UHVDC sending grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 42-47, 60.
- [5] 李立新, 周宇昊, 郑文广. 能源转型背景下分布式电源技术发展前景[J]. 发电技术, 2020, 41(6): 571-577.
- LI Lixin, ZHOU Yuhao, ZHENG Wenguang. Development prospect of distributed energy technology under the background of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 571-577.
- [6] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 73-78.
- HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [7] BASU M. Dynamic economic dispatch with demand-side management incorporating renewable energy sources and pumped hydro electric energy storage[J]. Electrical Engineering, 2019, 101(1): 877-893.
- [8] 王作家, 竺炜, 程志勇. 抽水蓄能发电对直流受端多态频率稳定的影响[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 346-353.
- WANG Zuoqia, ZHU Wei, CHENG Zhiyong. Influence of pumped storage power generation on multi-state frequency stability of DC Receiver[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 346-353.
- [9] 黄东启, 单学彪, 何嘉希, 等. 静止变频器分阶段启动控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 184-190.
- HUANG Dongqi, SHAN Xuebiao, HE Jiayi, et al. Start-up control strategy of static frequency converter in stages[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 184-190.
- [10] VALAVI M, NYSVEEN A. Variable-speed operation of hydropower plants: A look at the past, present, and future[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2018, 24(5): 18-27.
- [11] 许善椿, 郭春林, 王文举. 交流励磁调速水轮发电机负荷的优化调节[J]. 大电机技术, 1995(2): 10-12, 66.
- XU Shanchun, GUO Chunlin, WANG Wenju. Optimum load regulation of the variable speed hydrogenerator with AC excitation[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 1995(2): 10-12, 66.
- [12] 李和明, 张祥宇, 王毅, 等. 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 32-39, 188.
- LI Heming, ZHANG Xiangyu, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of DFIG-based wind turbines based on the optimal power tracking[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 32-39, 188.
- [13] ZHANG N, KANG C, KIRSCHEN D S, et al. Planning pumped storage capacity for wind power integration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 393-401.
- [14] MULGADI E, SINGH M, GEVORDIAN V, et al. Dynamic modeling of adjustable-speed pumped storage hydropower plant[C] // 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2015, Denver, CO, USA: 1-5.
- [15] 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.
- [16] ZHANG X, CHENG Y, YANG Z, et al. Water column separation in pump-turbine after load rejection: 1D-3D coupled simulation of a model pumped-storage system[J]. Renewable Energy, 2020, 163: 685-697.
- [17] 丁理杰, 刘姗姗, 史华勃. 水电高占比电网中水轮机模型对频率振荡特性影响及其适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 174-180.
- DING Lijie, LIU Shanmei, SHI Huabo. Influence of a turbine model on frequency oscillation characteristics and its adaptability in a high hydro-ratio power grid[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 174-180.
- [18] LIANG J, HARLEY R G. Pumped storage hydro-plant models for system transient and long-term dynamic studies[C] // IEEE Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 1-8.
- [19] CHENG Yan, TANG YI, DAI Jianfeng, et al. Uncertainty modeling of wind power frequency regulation potential considering distributed characteristics of forecast errors[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(3): 276-288.
- [20] 黄杰杰, 李生虎, 孙婷婷. 基于改进动态潮流的 DFIG 风电系统层级频率模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 68-75.
- HUANG Jiejie, LI Shenghu, SUN Tingting. Hierarchical frequency control for a power system with DFIG based on frequency prediction with improved dynamic power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 68-75.

- [21] 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 on rotor kinetic energy control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 17-22.
- [22] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 50-58.
- [23] XUE Y, TAI N. Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine[J]. Renewable Energy, 2011, 36(6): 671-677.
- [24] 蔡葆锐, 杨蕾, 黄伟. 基于惯性/下垂控制的变速型风电机组频率协调控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 169-177.
CAI Baorui, YANG Lei, HUANG Wei. Frequency coordination control of a variable speed wind turbine based on inertia/droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 169-177.
- [25] 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.
- [26] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 一种双馈风电机组一次调频协调控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 101-109.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. A collaborative control of primary frequency regulation for DFIG-WT[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2): 101-109.
- [27] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232.
- [28] 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.
- [29] 龚国仙, 吕静亮, 姜新建, 等. 参与一次调频的双馈式可变速抽水蓄能机组运行控制[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1878-1884.
GONG Guoxian, LÜ Jingliang, JIANG Xinjian, et al. Operation control of doubly fed adjustable speed pumped storage unit for primary frequency modulation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1878-1884.
- [30] 李辉, 黄樟坚, 刘海涛, 等. 交流励磁抽水蓄能机组快速功率响应控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 156-161, 175.
LI Hui, HUANG Zhangjian, LIU Haitao, et al. Control strategy of rapid power response for AC excited pump storage unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 156-161, 175.
- [31] 邹金, 赖旭, 汪宁渤. 大规模风电并网下的抽水蓄能机组调频控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 564-572.
ZOU Jin, LAI Xu, WANG Ningbo. Study on control of pumped storage units for frequency regulation in power systems integrated with large-scale wind power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 564-572.
- [32] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 34-35.

收稿日期: 2021-11-13; 修回日期: 2021-12-19

作者简介:

罗远翔(1975—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向电力系统稳定、大规模可再生能源并网研究;

E-mail: yuanxiangluo@163.com

李鑫明(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为可变速抽水蓄能技术、双馈电机控制理论; E-mail: 1749639673@qq.com

潘超(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容。E-mail: 31563018@qq.com

(编辑 姜新丽)