

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240417

适应高比例新能源电力系统的抽水蓄能自适应 调频控制及低频切泵策略

张萍¹, 胡龙¹, 邸宏亮¹, 刘德旭², 刘海涛¹

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要: 抽水蓄能具有突出的能量密度和功率密度优势。借助其快速响应和灵活调节能力, 能够有效平抑新能源出力随机波动, 提高系统频率稳定性。针对抽水蓄能如何融入电力系统频率稳定控制问题, 提出一种基于转速保护的变速抽水蓄能自适应综合惯量控制策略, 并采用优化思想对控制参数进行求解。在考虑短期频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)预测及变速抽水蓄能自适应综合惯量控制响应系统频率变化的基础上, 对传统电力系统低频切泵策略进行改进, 提出定速抽水蓄能自适应低频切泵控制策略。通过不同场景下的仿真验证, 结果表明, 将变速抽水蓄能自适应综合惯量调频控制策略与改进低频切泵策略相结合能够更好地适应高比例新能源电力系统, 提升系统的频率调节性能。

关键词: 抽水蓄能; 电力系统; 频率稳定控制; 高比例新能源; 频率变化率

Adaptive frequency regulation control and low-frequency pump-shedding strategy for pumped-storage in high-proportion new energy power systems

ZHANG Ping¹, HU Long¹, DI Hongliang¹, LIU Dexu², LIU Haitao¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: Pumped storage has outstanding advantages in energy density and power density. With its rapid response and flexible regulation capabilities, it can effectively smooth out the random fluctuations of new energy output and improve system frequency stability. To address the integration of pumped storage into power system frequency stability control, an adaptive integrated inertia control strategy based on speed protection for variable-speed pumped storage is proposed, and optimization methods are used to solve the control parameters. Considering the prediction of short-term rate of change of frequency (RoCoF) and the response of the variable-speed pumped storage adaptive integrated inertia control to system frequency change, the traditional low-frequency pump-shedding strategy of power systems is improved, and a fixed-speed pumped storage adaptive low-frequency pump-shedding control strategy is proposed. Simulation verification under different scenarios shows that combining the variable-speed pumped storage adaptive integrated inertia frequency regulation control strategy with the improved low-frequency pump-shedding strategy can better adapt to the high-proportion new energy power systems and improve the system's frequency regulation performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51867085).

Key words: pumped storage; power system; frequency stability control; high-proportion new energy; rate of change of frequency

0 引言

在新型电力系统构建进程中, 高比例新能源、

高比例电力电子元件并网加剧了电力系统安全稳定控制难度, 惯性响应降低^[1-2]、调频资源短缺、不确定性扰动增加^[3-5]等电网频率稳定性问题日益严峻。在此背景下, 利用调节能力优越、兼具能量密度大和功率密度大突出优势的抽水蓄能来平抑新能源出

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51867085)

力波动、抵御系统不确定性扰动，成为极具实用价值的重要手段^[6-8]。然而抽水蓄能具有不同机组类型及多种运行工况，参与电网频率的控制方法较普通同步发电机复杂，如何结合机组特性及运行工况发挥频率响应能力，参与并融入大电网频率稳定控制策略，仍有待研究。

抽水蓄能机组可分为定速抽水机组和变速抽水机组(variable-speed pumped storage units, VSPSU)，定速抽水机组在发电工况下通过调节导叶开度进行频率调节，在抽水工况下不具备频率调节能力，但可通过切泵来填补电网有功缺额。而变速抽水机组由于功率解耦控制，机组不能自主参与系统调频。为此，如何从抽水蓄能自身优势出发，挖掘调频资源参与频率控制，对于保障系统频率安全、推动新型电力系统的发展具有重要意义。

目前关于 VSPSU 和定速抽水机组参与系统频率控制已取得一定的进展。对 VSPSU 参与系统频率调节的研究集中在当电网频率发生波动时，其如何通过附加控制环节快速为电网提供功率支撑。文献[9]提出一种适用于含风电电网的 VSPSU 转子动能和导叶开度协调的频率控制策略。文献[10]通过下垂控制建立了 VSPSU 调频机理模型。文献[11]在建立 VSPSU 抽水工况机电暂态模型的基础上，分析了抽水工况机组的调频机理，并给出了控制器的参数参考范围。文献[12]将转速和导叶开度作为控制对象，提出了水泵水轮机和双馈电机协同调频策略。文献[13]提出一种基于附加转速修正量的频率响应特性优化 VSPSU 控制策略，将频率偏差整定为转速修正量来实现频率调节。

国外学者对 VSPSU 的研究主要集中在功率解耦控制及其建模方面，文献[14]对 VSPSU 进行了建模仿真，并分析了其稳态与暂态特性。文献[15]提出通过改变转速指令来减小转速的变化幅值，从而避免变速机组的功率波动、实现水力干扰工况下的稳定出力。文献[16]通过分析机组运行特性提出了快速功率控制策略。上述研究虽验证了 VSPSU 的快速调频能力，但并未考虑到固定参数难以保证机组在不同状态下稳定运行。

针对定速抽水机组参与系统频率的研究主要集中在低频切泵和工况转换上。文献[17]研究了定速和变速抽水蓄电站对电网频率稳定性的调节效果。文献[18]将低频切泵和低频减载相结合，提出适用于电网频率安全的两者协调优化方法。文献[19]设计了以蓄能切泵为主体的稳控切泵切负荷、广域低频集中切泵、就地低频分散切泵和低频减载组成的多层次低频综合稳定控制系统。

因此，抽水蓄能可高效地参与电网频率稳定控制。大部分文献对 VSPSU 频率响应过程建模时，仅考虑附加频率环节，只能反映 VSPSU 快速响应特性，不能准确反映其内部动态特性，且频率控制策略常采用固定调频参数，不能充分发挥机组调频资源。定速抽水机组在水泵工况下的传统低频切泵策略未能考虑新能源加入的影响，当系统频率下降过快时，容易导致频率出现超调和过切现象。

为此，在现有研究基础上，提出基于转速保护的抽水蓄能自适应综合惯量控制策略，以及考虑短期频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)预测的低频切泵控制策略。通过深入分析 VSPSU 的调频机制，构建简化的电磁频率响应模型，并提出基于不同频率响应阶段的自适应综合惯量控制策略，通过双曲正切函数建立控制系数和 RoCoF 的耦合关系，并引入了转速保护系数以充分保护机组转速，通过优化算法来确定最优的调频参数。针对传统低频切泵策略在高比例新能源系统中可能不再适用的问题，提出了考虑短期 RoCoF 预测的低频切泵控制策略。最后，通过仿真对比验证了所提改进控制策略的有效性。

1 系统频率响应模型

1.1 变速抽水机组数学模型

变速抽水机组主要由可逆式水泵水轮机及其调节系统、双馈异步电机(doubly-fed induction machine, DFIM)、背靠背变流器和变流器控制器组成^[20]，其结构拓扑如图 1 所示。

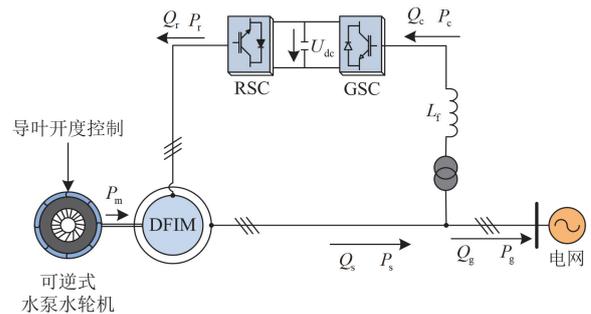


图 1 变速抽水机组结构拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of variable speed pumped storage unit structure

图中： P_m 为机械功率； P_s 、 Q_s 分别为定子侧有功功率和无功功率； P_r 、 Q_r 分别为转子侧有功功率和无功功率； P_c 、 Q_c 分别为电网流向变流器的有功功率和无功功率； P_g 、 Q_g 分别为流入电网的有功功率和无功功率； U_{dc} 为变流器的直流母线电压。

根据坐标变换原理, DFIM 在 dq 同步坐标下的 P_s 、 Q_s 分别为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2}(u_{sd}i_{sd} + u_{sq}i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq}i_{sd} - u_{sd}i_{sq}) \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_{sd}i_{sq} - \psi_{sq}i_{sd}) = \frac{3}{2}p(\psi_{rq}i_{rd} - \psi_{rd}i_{rq}) \quad (2)$$

转子的运动方程可表示为

$$2H_G \frac{d\Delta\omega_r}{dt} = T_e - T_m - D_G \Delta\omega_r \quad (3)$$

式中: ψ 、 u 、 i 分别为磁通、电压和电流; 下标 s 、 r 分别表示 DFIM 定子侧和转子侧的值; 下标 d 、 q 分别表示每一变量在同步旋转参考系下的 d 轴和 q 轴分量; T_e 为电磁转矩; T_m 为机械转矩; p 为极对数; H_G 为机组惯性时间常数; D_G 为机组阻尼系数; ω_r 为转子角速度; $\Delta\omega_r$ 为转子角速度变化量。

VSPSU 可采用功率优先控制策略和转速优先控制策略。发电工况下采用功率优先控制策略, 利用综合惯量控制环节将频率偏差转换为附加有功功率指令, 抽水工况下由于水泵的输入功率与转速的三次方成正比, 故将综合惯量控制环节构建在变流器的转速控制处, 由变流器实现对机组转速的直接调节, 抽水工况下机组调频出力与转速的关系可表示为 $P = k\omega_r^3$, k 为功率-转速系数。功率优先控制策略如图 2 所示^[21]。

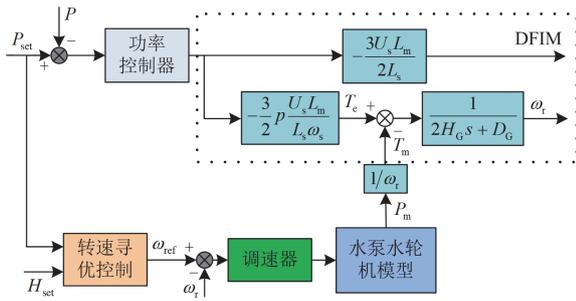


图 2 功率优先控制策略

Fig. 2 Power-priority control strategy

图中: L_s 为定子电感; L_m 为互感; H_{set} 为静水头; P 和 P_{set} 分别为机组当前有功功率和有功功率参考值; y 为导叶开度; ω_s 为定子角速度; ω_{ref} 为转速最优值。

水泵水轮机数学模型可表示为水泵水轮机输出机械功率与导叶开度之间的关系。采用理想水泵水轮机模型, 表示为

$$P_m = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5T_w s} y \quad (4)$$

式中, T_w 为水流惯性时间常数。

转速和导叶开度最优值可简化表示为与水头和功率有关的线性函数^[22], 分别如式(5)和式(6)所示。

$$\omega_{ref} = -0.85 + 1.25P_{set} - 0.25H_{set} \quad (5)$$

$$y_{ref} = 0.8 + (P_{set} - 0.8) - (H_{set} - 0.8) \quad (6)$$

式中, y_{ref} 为导叶开度最优值。

转子侧变流器采用双环控制结构, 其中电流内环负责追踪转子电流, 其响应时间在毫秒级。因此, 变流器的响应模型 $G_q(s)$ 可以简化为一个一阶惯性环节, 如式(7)所示。

$$G_q(s) = \frac{i_{qr}}{i_{qr}^*} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (7)$$

式中: i_{qr}^* 为转子电流参考值; τ 为变流器响应时间, 按照经验取值为 0.02 s。

由 τ 值可知, 电流内环的响应速度较机电暂态过程快得多, 故认为应用综合惯量控制时, 变速抽水机组的功率变化不存在延时。

调速器主要由伺服系统和 PI 控制器构成, 其传递函数可分别表示为

$$G_{sf}(s) = \frac{1}{T_y s + 1} \quad (8)$$

$$G_{pi}(s) = K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s} \quad (9)$$

式中: T_y 为伺服时间常数; K_{p1} 和 K_{i1} 分别为比例和积分系数。

1.2 系统频率响应模型

由于 VSPSU 发电机转子转速与电网频率完全解耦, 当电网频率发生变化时, VSPSU 不具备为电网主动提供频率响应的能力。因此, 需在控制系统中加入附加频率控制环节来实现调频功能。目前主要采用双馈风机综合惯量控制策略, 通过变流器来控制机组有功功率, 传统综合惯量控制策略如图 3 所示, 图中 f_N 为额定频率, f 为系统频率。

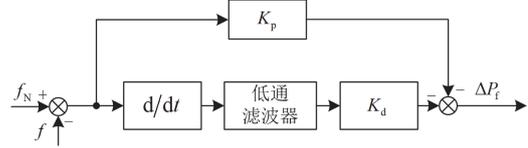


图 3 传统综合惯量控制策略

Fig. 3 Traditional integrated inertial control strategy

则综合惯量控制下的有功增量 ΔP_f 为

$$\Delta P_f = -K_p \Delta f - K_d \frac{d\Delta f}{dt} \quad (10)$$

率变化过程中提供更为精确和灵活的控制。

图6展示了在系统功率缺额情况下的典型频率响应曲线^[24]。图中, Δf_m 为系统最大频率偏差, Δf_s 为系统稳态频率偏差, A 点代表故障发生前的系统频率稳态运行点, B 点为故障发生后系统频率最低点, C 点为系统在故障后的准稳态运行点。根据频率响应曲线的变化情况, 可以将其分为3个阶段, 如表1所示。

针对不同的频率动态阶段, 需采用不同的调频控制参数。

1) 在阶段1, 由于系统频率下降较快, 因此采用较大的调频控制系数, 以充分利用转子动能, 为系统提供必要的功率支持。

2) 进入阶段2后, 随着 RoCoF 的减小, 系统频率下降速度减缓, 此时调整调频控制系数使其随 RoCoF 的减小而减小, 防止机组过度释放转子动能。

3) 在阶段3, 系统频率开始恢复, 此时应将调频控制系数设置得较小, 以保留转子动能, 确保系统有足够的储备能力应对后续可能出现的突发状况。

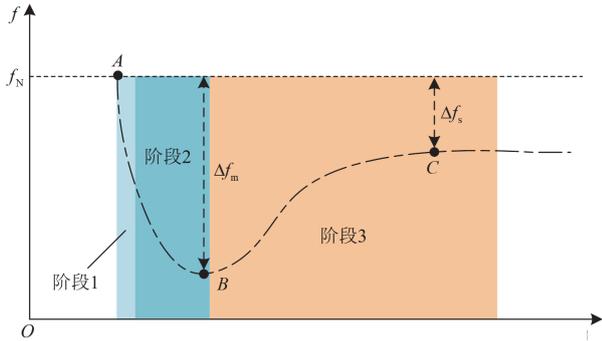


图6 典型频率响应曲线

Fig. 6 Typical frequency response curve

表1 频率响应曲线不同阶段

Table 1 Frequency response curve at different stages

| 阶段 | 频率特性 |
|-----|------------------------------------|
| 阶段1 | Δf 在频率变化初始阶段较小, 频率变化率绝对值较大 |
| 阶段2 | 频率逐渐下降, 频率变化率逐渐减小, Δf 增大 |
| 阶段3 | 频率逐渐恢复, Δf 开始减小, 频率变化率变为正值 |

自适应综合惯量控制策略的核心在于控制系数的自适应调节, 该调节应满足在改善最大频率偏差的同时为系统提供足够的惯性支撑, 并加速系统频率的恢复。双曲正切函数曲线具有平滑性、单调性和对称性, 通过该函数可使自适应综合惯量控制策略能够更加灵活和精确地适应系统频率变化的不同阶段, 从而提供更好的调频性能。所建立的综合惯

量控制系数与 RoCoF 的关系为

$$K_p = \max \left(K_p^{\max} \frac{e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]}}{e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]} + 1}, K_p^{\max} \frac{e^{\left[a (\Delta f - n) \right]}}{e^{\left[a (\Delta f - n) \right]} + 1} \right) \quad (13)$$

$$K_d = K_d^{\max} e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]} / \left(e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]} + 1 \right) \quad (14)$$

式中: K_d^{\max} 和 K_p^{\max} 分别为虚拟惯性系数和下垂系数最大值; a 为自适应调节系数; n 为函数平移因子。

在自适应综合惯量控制中加入转速保护系数, 防止机组转速过低导致频率二次跌落。当 VS PSU 转速为 ω_r 时, 转子可释放的动能 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_r^2 - \omega_{\min}^2) \quad (15)$$

式中: J 为 VS PSU 的等效转动惯量; ω_{\min} 为转速最小值。

定义转速保护系数 φ 为

$$\varphi = \frac{\omega_r^2 - \omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2} \quad (16)$$

式中, ω_{\max} 为转速最大值。 φ 随着 ω_r 减小而减小, 控制系统通过降低转速保护系数从而改变机组有功出力, 保护机组转速。

2.2 自适应综合惯量控制

图7为 VS PSU 自适应综合惯量控制策略图, 其中: $T_{M,De}$ 为频率测量延时系数; ΔP_{VIC} 为 VS PSU 参与调频时有功参考值的增量。当频率偏差超过设定的死区后, 综合惯量控制通过频率控制器进行有功调制, 释放机组转子动能来抵消有功缺额。

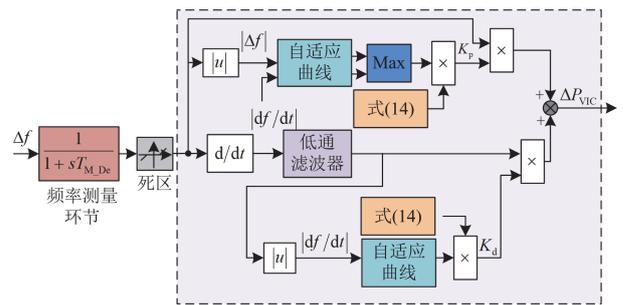


图7 VS PSU 自适应综合惯量控制策略图

Fig. 7 Adaptive integrated inertial control strategy of VS PSU

结合式(13)一式(16), K_p 和 K_d 与机组转速和 RoCoF 的关系可表示为

$$K_d = \varphi K_d^{\max} e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]} / \left(e^{\left[a \left(\frac{df}{dt} - n \right) \right]} + 1 \right) \quad (17)$$

$$K_p = \varphi \max \left(K_p^{\max} \frac{e^{[a(\frac{df}{dt}-n)]}}{e^{[a(\frac{df}{dt}-n)]} + 1}, K_p^{\max} \frac{e^{[a(\Delta f-n)]}}{e^{[a(\Delta f-n)]} + 1} \right) \quad (18)$$

由上述分析及式(15)、式(16)可知, a 、 n 的取值决定了系统在受扰动后的频率变化趋势。由于机组的有功出力受到多种因素的影响, 因此很难直接得到机组输出功率与调频参数之间的解耦关系。因此, 采用优化思想来确定不同场景下的最优控制参数。利用式(19)所示的目标函数, 采用改进鲸鱼优化算法对 a 、 n 进行求解^[25], 优化得到的结果即为对应工况下的最优调频控制参数。

$$y = \min \left(\int_0^T A_1 (\Delta f)^2 dt + A_2 \int_0^T (\Delta P_{\text{ref}})^2 dt \right) \quad (19)$$

式中: T 为仿真时间; A_1 、 A_2 为权重系数, 应优先考虑系统频率偏差最小, 故满足 $A_1 > A_2 > 0$ 。

因为 a 、 n 主要由扰动初期 RoCoF 的值决定, 当不同场景下初期 RoCoF 的值变化不大时, 就不需要对调频系数进行更新, 故设置判据来判定是否更新调频控制参数, 当 $\left| \frac{df/dt}{2} - a \right| \geq 0.1$ 且 $|df/dt| \geq$

0.2 成立时, 系统进行调频控制系数寻优, 不满足判据时, 保持原控制参数不变。

3 VSPSU 参与调频的优化低频切泵策略

3.1 高比例新能源接入对传统低频切泵的影响

低频切泵可迅速响应频率的变化, 有效支撑初期频率的稳定。新能源出力波动和电力电子设备的大规模接入降低了系统的频率支撑能力, 当电网发生扰动时, 相同的功率缺额下含高比例新能源的电网系统频率下降速度及幅度都会增大。因此, 在新能源占比高的电网中, 需要验证传统低频切泵方案的有效性。

低频切泵方案设计的目标是优化系统频率响应, 确保在不同场景下, 系统能具有良好的频率恢复动态性能。传统低频切泵策略整定如表 2 所示, 不同新能源渗透率下的切泵频率曲线如图 8 所示。

由图 8 可知, 在不含新能源的系统中, 低频切泵动作 3 轮, 未出现超调和过切现象。而在新能源占比为 40% 的系统中, 低频切泵动作 4 轮, 频率出现了超调和过切。传统的低频切泵方案设定未考虑系统惯性对频率的作用, 在系统惯性较低的情况下, 功率缺额初期可能导致频率急剧下降, 进而引发低频切泵装置过切, 导致频率出现超调。同时, 传统低频切泵策略仅在系统频率低于设定值时才启动切泵, 在大功率缺额情况下可能会错失切泵时机。因此, 为适应新能源大规模接入的电网, 需提出新的

低频切泵优化方案。

表 2 传统低频切泵策略整定

Table 2 Traditional low frequency cutting pump strategy setting

| 轮次 | 频率整定值/Hz | 延时/s | 切泵量/% |
|----|----------|------|-------|
| 1 | 49.7 | 0.2 | 4 |
| 2 | 49.5 | 0.2 | 4 |
| 3 | 49.3 | 0.2 | 4 |
| 4 | 49.1 | 0.2 | 4 |

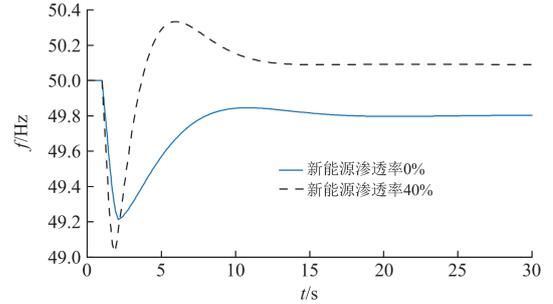


图 8 不同新能源渗透率下的切泵频率曲线

Fig. 8 Cutting pump frequency curve under different renewable energy permeability

3.2 考虑短期 RoCoF 预测及 VSPSU 自适应综合惯量控制的低频切泵策略

考虑到高比例新能源接入对低频切泵的影响, 针对现行低频切泵方案的不足, 提出一种短期 RoCoF 预测的低频切泵改进方法, 并在多轮切泵过程中建立加速切泵的判据, 提高低频切泵稳定性与准确性。由于电力系统信息传输具有时延性, 通过短期频率变化率预测可以更快速实现切泵。迭代公式如式(20)所示, 若已知当前系统 RoCoF 及其变化率 ν 值, 则可在短时间 Δt 内初步预知下一时刻 RoCoF 变化情况。

$$\frac{df}{dt}(t+1) = \frac{df}{dt}(t) + \nu(t) \times \Delta t \quad (20)$$

式中, $\nu(t)$ 为 t 时刻的 RoCoF 变化率。

由式(20)可知, 通过精确测量当前系统频率变化率斜率及当前系统的频率变化率值, 可在线获取扰动发生后系统短时间的频率变化率预测值。由于在扰动发生后, 调速器和负荷等会响应频率的动态变化, 因此, 本文取 Δt 为 0.2 s 以确保估计的准确性, 同时为了提高预测的可靠性, 使用高通滤波器来去除信号中的噪声和随机干扰。

由于高比例新能源电力系统在受到负荷扰动后, 系统的频率变化率较大, 若不考虑 RoCoF 的影响进行低频切泵, 会导致低频切泵装置不能及时抑制频率的变化。因此在低频切泵策略中加入加速切泵判据^[26], 设置各轮切泵及加速切泵判据阈值 f_i 、

$w_{i(i+1)}$ 及 $w_{i(i+2)}$, 当系统频率降至 f_i 时, 通过式(20)计算 Δt 后的频率变化率 $\frac{df}{dt}(t+1)$, 通过比较 $\frac{df}{dt}(t+1)$ 与 $w_{i(i+1)}$ 和 $w_{i(i+2)}$ 的关系, 决定是否提前执行第 $i+1$ 轮和第 $i+2$ 轮的切泵操作。当 $\frac{df}{dt}(t+1) > w_{i(i+1)}$ 时, 进行 1 轮切泵; 当 $w_{i(i+2)} < \frac{df}{dt}(t+1) \leq w_{i(i+1)}$ 时, 同时进行 2 轮切泵; 当 $\frac{df}{dt}(t+1) \leq w_{i(i+2)}$ 时, 同时进行 3 轮切泵。

当电网频率开始下降时, 系统会在特定的频率点决定是否要进行加速切泵来稳定频率。但如果系统频率下降过快, 当前切泵动作还未进行, 频率就降至下一个频率点, 系统可能会错误地在下一个频率点加速切泵, 导致出现过切现象。为此在 f_i 处设置闭锁判据, 当系统频率下降至 f_{i-2} 或 f_{i-1} 时满足 f_i 点加速切泵的条件, 或者第 i 轮的切泵动作已开始, 此时闭锁 f_i 处加速切泵动作, 这样可以确保系统频率不会下降太快, 同时也避免了过切现象。

优化低频切泵及 VSPSU 自适应综合惯量控制联合调频策略如图 9 所示, 当检测到频率偏差超出死区后, 系统判断是否需要更新调频控制参数, 参数更新环节结束后, VSPSU 通过自适应综合惯量控

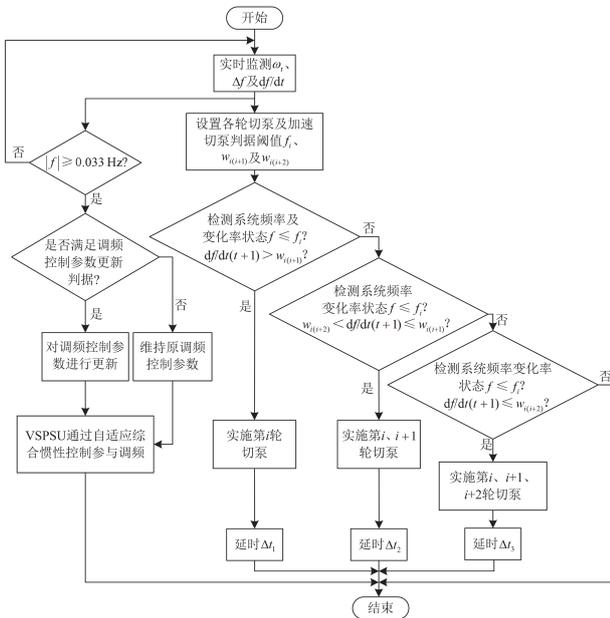


图 9 优化低频切泵及 VSPSU 自适应综合惯量控制联合调频策略图

Fig. 9 Optimized low-frequency pump-shedding and VSPSU adaptive integrated inertia control jointly for frequency regulation strategy map

制参与电网频率调节。与此同时, 当频率及频率变化率满足相应切泵判据时, 系统通过切泵或加速切泵操作来抑制频率下降。图中 Δt_i 为低频切泵第 i 轮的延时。

4 仿真分析

为验证所提策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建如图 10 所示的仿真模型结构图。系统总装机容量为 1000 MW, 新能源机组 G_3 占比为 40%, 且不考虑新能源机组的一次调频能力, 火电机组 G_1 占比为 12%, 定速抽蓄机组 G_4 占比为 24%, 变速抽蓄机组 G_2 占比为 24%, L_1 、 L_2 和 L_3 为系统有功负荷, 分别为 125、90、100 MW。设定一次调频死区为 0.033 Hz, 频率基准值为 50 Hz, 仿真系统的基本参数如表 3 所示。

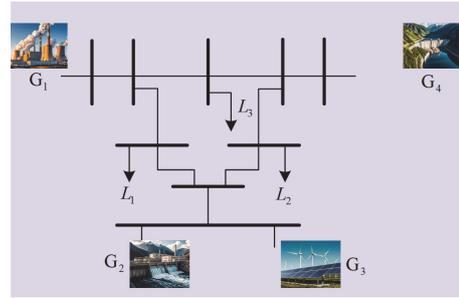


图 10 仿真模型结构图

Fig. 10 Simulation model structure diagram

表 3 仿真系统基本参数

Table 3 Fundamental parameters of simulation system

| 机组 | 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|------------|--------------|--------|----------------------|-------|
| 变速抽蓄 机组 | R_s/Ω | 0.0115 | H_C/s | 3.5 |
| | L_s/H | 1.3 | T_w/s | 0.5 |
| | R_f/Ω | 0.0128 | T_f/s | 0.1 |
| | L_m/H | 3.475 | $\omega_{\min}/p.u.$ | 0.72 |
| 火电机组 | P | 4 | $\omega_{\max}/p.u.$ | 1.2 |
| | $T_{M,De}/s$ | 0.2 | | |
| | $R_H/p.u.$ | 0.05 | T_R/s | 8 |
| 定速抽蓄 机组 | $F_H/p.u.$ | 0.3 | T_C/s | 0 |
| | T_H/s | 0.3 | | |
| | $R_T/p.u.$ | 0.04 | T_V/s | 61.25 |
| | T_T/s | 0.204 | T_w/s | 0.75 |
| 电力系统 | T_K/s | 10 | | |
| | $\mu/\%$ | 40 | $k_H/\%$ | 12 |
| | D | 2 | $k_f/\%$ | 24 |

系统频率测量环节可以用一阶惯性环节表示, 其模型如图 7 中频率测量环节所示。相同功率缺额

下,采用不同频率测量延时系数 T_{M_De} 时得到自适应综合惯量控制下系统的频率响应曲线,如图11所示。由图11可知, T_{M_De} 对控制策略整体影响不大,但随着 T_{M_De} 的增大,系统达到稳态频率的时间略有增加。

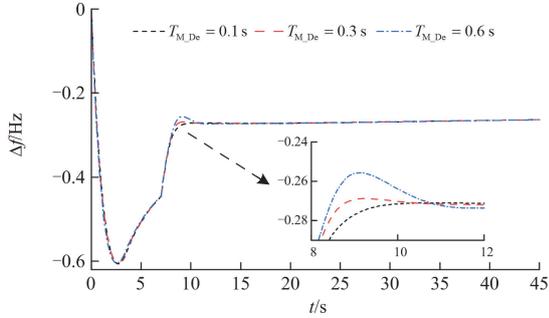


图 11 不同频率测量延时系数下系统频率响应曲线

Fig. 11 Frequency response curves of the system with different frequency measurement delay factors

调频性能参数主要包括最大频率偏差 Δf_m 、稳态频率偏差 Δf_s 、峰值时间 t_m 、稳态时间 t_s 以及频率下降速率 α , $\alpha = |\Delta f_m|/t_m$, $|\Delta f_m|$ 、 $|\Delta f_s|$ 、 α 越小调频效果越好^[27]。对自适应综合惯量控制策略进行仿真分析时,将本文策略与传统综合惯量控制、自适应下垂控制+传统虚拟惯量控制(简称为改进下垂控制)和自适应虚拟惯量控制+传统下垂控制(简称为改进虚拟惯量控制)进行对比分析和调频指标计算来检验本文策略的调频能力。

4.1 自适应综合惯量控制策略仿真分析

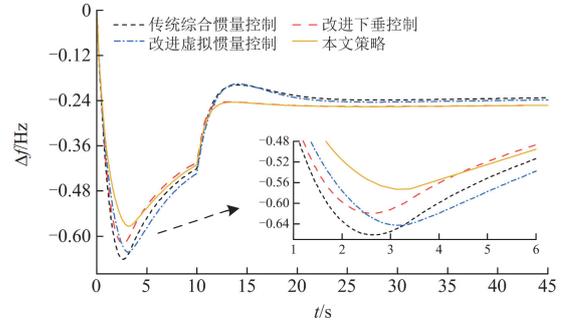
仿真设定 VSPSU 处于发电工况,初始转速为 0.95 p.u.,最优转速指令保持不变,为了分析不同扰动下自适应综合惯量控制策略的调频效果,分别设置如下两种不同的算例场景。场景 1: $t = 0$ s 时负荷 L_1 突增 7%、 $t = 7$ s 时减为 5%; 场景 2: 为了模拟新能源机组的出力波动,负荷 L_2 设置为幅值-2%~2%的随机扰动,并设置负荷 L_1 在 $t = 5$ s 时突增 5%、 $t = 25$ s 时增至 7%。

场景 1 的仿真结果如图 12 和表 4 所示。由图 12(a)和图12(b)可知,在负荷连续变化的情况下,本文策略能显著降低系统频率变化率,频率曲线不易出现波动,且最大频率偏差最小,频率恢复至稳态的时间最短。本文策略能够很好地改善最大频率偏差和频率变化率,降低稳态频率恢复时间。

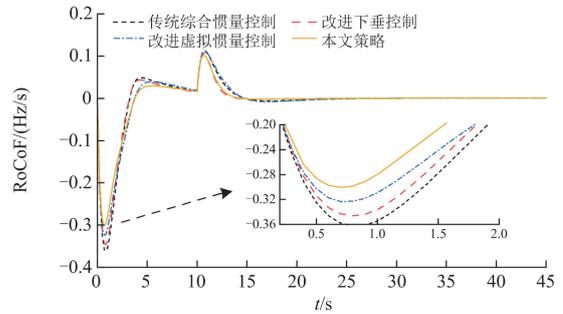
由表 4 可得,本文策略频率偏差最大值相比于传统综合惯量控制降低了 15%,由于加入了转速保护系数和自适应函数,本文策略频率稳态值较传统控制略有降低,当功率缺额较大时,本文控制策

略能非常有效地保护转子转速,防止转速越限;与改进下垂控制相比,虽然稳态频率偏差值大致相同,但频率偏差最大值降低了 9.3%;相比改进虚拟惯量控制,稳态频率偏差降低了 10.5%。

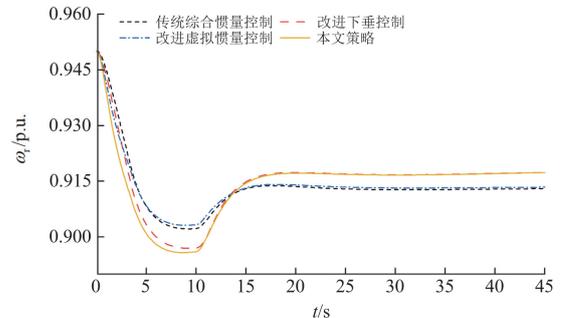
机组转子转速如图 12(c)所示,本文策略在频率变化较大时,释放的转子动能最多,而在频率恢



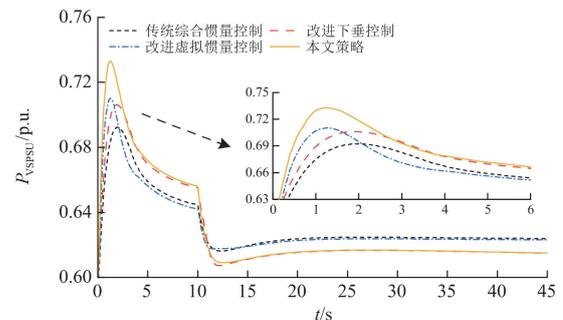
(a) 系统频率偏差



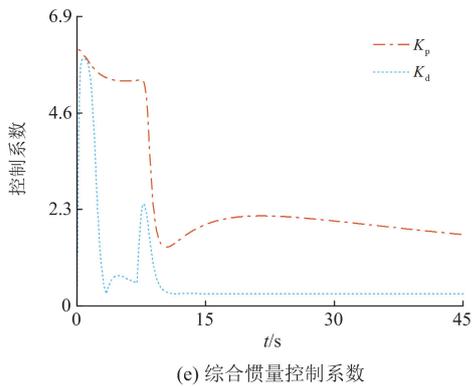
(b) 频率变化率



(c) VSPSU转速



(d) VSPSU有功出力



(e) 综合惯量控制系数

图 12 场景 1 仿真结果

Fig. 12 Simulation results for Scenario 1

表 4 场景 1 下不同控制策略调频指标

Table 4 Frequency regulation performance indicators under different control strategies in Scenario 1

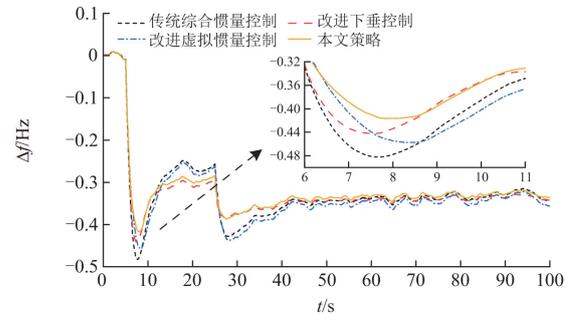
| 控制策略 | $ \Delta f_m /\text{Hz}$ | $ \Delta f_s /\text{Hz}$ | α |
|----------|--------------------------|--------------------------|----------|
| 传统综合惯量控制 | 0.661 | 0.237 | 0.25 |
| 改进下垂控制 | 0.618 | 0.25 | 0.233 |
| 改进虚拟惯量控制 | 0.627 | 0.242 | 0.196 |
| 本文策略 | 0.561 | 0.248 | 0.173 |

复稳态时, 转速恢复值与下垂控制大致相同, 这是由于后期 RoCoF 的值很小, 通过自适应算法得到的虚拟惯量控制系数极小, 为此, 机组出力基本一致, 转速变化相应地基本保持一致。机组有功出力如图 12(d)所示, 当频率曲线位于阶段 1 时, 此时本文策略的下垂系数和虚拟惯量系数都比较大, 可以降低频率变化率, 而在频率恢复阶段, 随着 RoCoF、频率偏差及转速的降低, VSPSU 有功出力逐渐降低, 防止转速越限。综合惯量控制系数的变化如图 12(e)所示, 综合惯量控制系数根据频率和频率变化率实时调整, 当系统频率变化率较大时, 控制系数取较大值来增加机组出力, 随着频率逐渐恢复, 控制系数也逐渐降低, 机组出力减小, 防止机组转速越限。

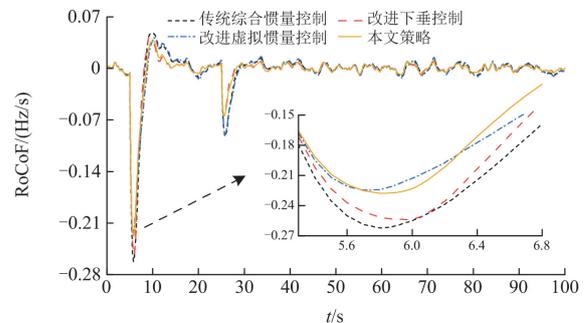
场景 2 的仿真结果如图 13 和表 5 所示, 结合图 13(a)和图 13(b)可知, 本文策略相比其他 3 种策略, 在一次扰动和二次扰动下均能将最大频率偏差和频率变化率保持在最小值, 并且在扰动发生后, 系统频率不易出现较大的波动, 在随机扰动下整体频率曲线较为平滑。由图 13(c)和图 13(d)可知, 本文策略可以快速地响应负荷波动, 虽然改进下垂控制在后期与本文策略调频能力相同, 但本文策略能更好地提升频率最低点。连续扰动下综合惯量控制系数的变化如图 13(e)所示, 由于系统频率偏差未能消除, 故 K_p 最终保持在一个较大值, 同时也增加了机组出

力, 导致机组转速略低于其他策略。

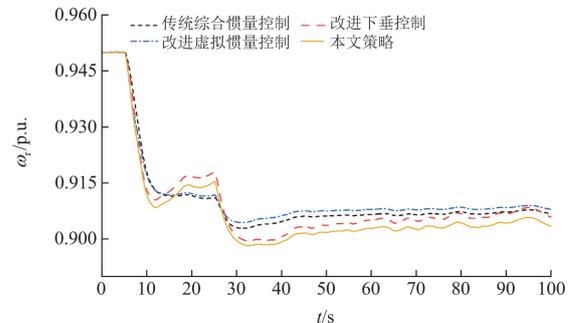
由场景 1、2 的仿真结果可得, 本文策略在不同的阶跃负荷扰动下都能保持较好的调频效果, 并且在频率变化率较大时, 本文策略调制的有功功率最多, 抑制频率变化效果最优。在频率恢复阶段, 本文策略可以利用更少的转子动能实现更好的调频效果。



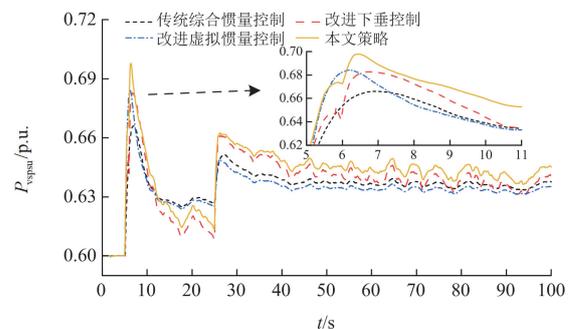
(a) 系统频率偏差



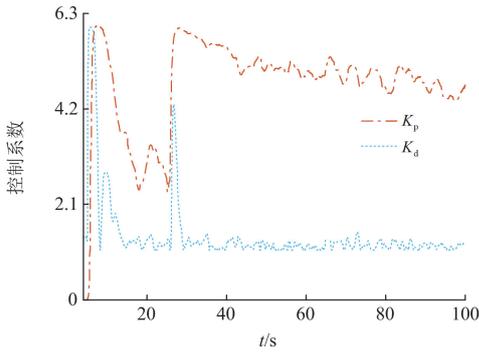
(b) 频率变化率



(c) VSPSU 转速



(d) VSPSU 有功出力



(e) 综合惯量控制系数

图 13 场景 2 仿真结果

Fig. 13 Simulation results for Scenario 2

表 5 场景 2 下不同控制策略调频指标

Table 5 Frequency regulation performance indicators under different control strategies in Scenario 2

| 扰动 | 控制策略 | $ \Delta f_m /\text{Hz}$ | t_m/s | 频率变化率 |
|------------------|----------|--------------------------|----------------|-------|
| 5 s 时负荷 突增 5% | 传统综合惯量控制 | 0.4825 | 7.7 | 最大 |
| | 改进下垂控制 | 0.45 | 7.66 | 大 |
| | 改进虚拟惯量控制 | 0.457 | 8.5 | 小 |
| | 本文策略 | 0.41 | 8.2 | 最小 |
| 25 s 时 增至 7% | 传统综合惯量控制 | 0.427 | 27.8 | 最大 |
| | 改进下垂控制 | 0.4 | 24.6 | 小 |
| | 改进虚拟惯量控制 | 0.44 | 28.6 | 大 |
| | 本文策略 | 0.38 | 27.93 | 最小 |

4.2 优化低频切泵及 VSPSU 自适应综合惯量控制联合调频策略仿真分析

为验证所提出的优化低频切泵和自适应综合惯量控制策略联合调频策略的有效性，设置两种不同的算例场景：1) 负荷 L_1 在 $t=0\text{ s}$ 时突增 18%、 $t=3\text{ s}$ 时降至 15%；2) 负荷 L_1 在 $t=0\text{ s}$ 时负荷突增 10%、 $t=3\text{ s}$ 时增至 14%。传统低频切泵策略整定如表 6 所示，改进低频切泵策略整定如表 7 所示。考虑如下 3 种不同策略，(1) 策略 1：VSPSU 不参与调频，实施传统低频切泵。(2) 策略 2：VSPSU 不参与调频，实施改进低频切泵。(3) 策略 3：VSPSU 采用自适应综合惯量控制进行调频，并实施改进低频切泵。

表 6 传统低频切泵策略整定

Table 6 Traditional low frequency pump-shedding scheme setting

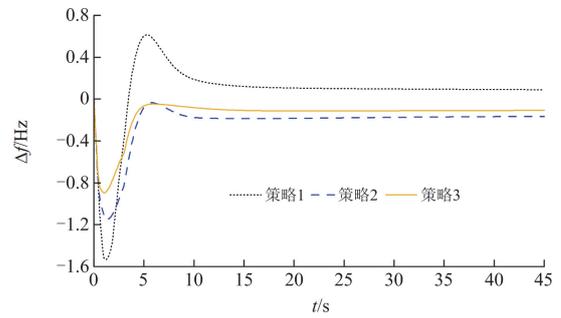
| 轮次 | 频率整定值/Hz | 延时/s | 切泵量/% |
|----|----------|------|-------|
| 1 | 49.6 | 0.2 | 4 |
| 2 | 49.4 | 0.2 | 4 |
| 3 | 49.2 | 0.2 | 4 |
| 4 | 49.0 | 0.2 | 4 |

表 7 改进低频切泵策略整定

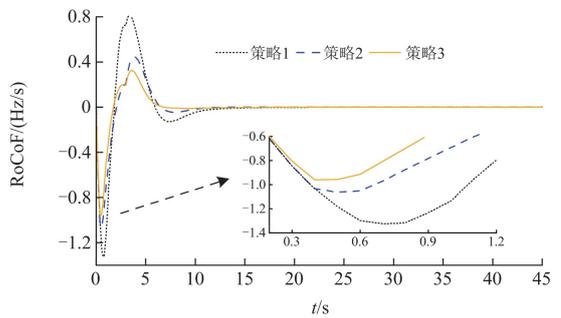
Table 7 Improved low frequency pump-shedding scheme setting

| 轮次 | 频率整定值/Hz | $w_{i(i+1)}/(\text{Hz/s})$ | $w_{i(i+2)}/(\text{Hz/s})$ | 延时/s | 切泵量/% |
|----|----------|----------------------------|----------------------------|------|-------|
| 1 | 49.6 | -0.35 | -0.7 | 0.2 | 4 |
| 2 | 49.4 | -0.7 | -1.05 | 0.2 | 4 |
| 3 | 49.2 | -1.05 | — | 0.2 | 4 |
| 4 | 49.0 | — | — | 0.2 | 4 |

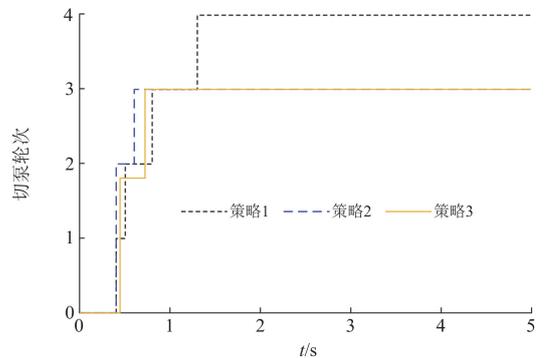
场景 1 的仿真结果如图 14 和表 8 所示，由仿真结果可知，策略 1 切泵 4 轮，策略 2 和策略 3 切泵 3 轮。由表 8 可知，策略 2 的 Δf_m 较于策略 1 降低了 25.3%， t_s 减少了 4.12 s，故优化的低频切泵控制



(a) 系统频率偏差



(b) 系统频率变化率



(c) 低频切泵动作结果

图 14 场景 1 低频切泵仿真结果

Fig. 14 Low frequency pump-shedding simulation results in Scenario 1

表 8 场景 1 下不同切泵策略调频指标

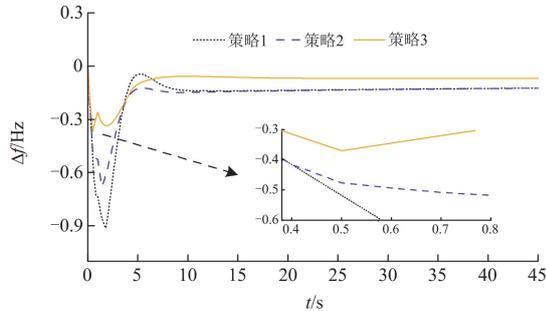
Table 8 Frequency regulation performance indicators under different pump-shedding strategies in Scenario 1

| 策略 | $ \Delta f_m /\text{Hz}$ | t_m/s | t_s/s | α |
|------|--------------------------|----------------|----------------|----------|
| 策略 1 | 1.533 | 1.2 | 15.044 | 1.278 |
| 策略 2 | 1.145 | 1.4 | 10.924 | 0.818 |
| 策略 3 | 0.895 | 1.18 | 7.86 | 0.758 |

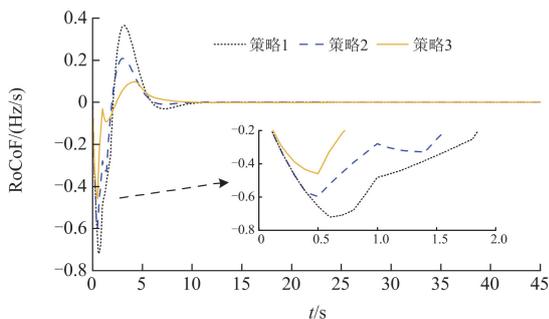
策略能以更少的切泵轮次达到更好的频率恢复效果。而策略 3 的 Δf_m 较策略 2 降低了 21.8%， t_s 减少了 3.064 s， α 相较于前两种策略最小，且策略 3 的 RoCoF 较其他策略始终保持最小值，稳态频率值较策略 2 有所提升，故将 VSPSU 自适应综合惯量调频控制策略与优化低频切泵控制策略相结合，能有效地防止系统频率出现超调和过切现象，并增强了系统的频率稳定性。

场景 2 的仿真结果如图 15 和表 9 所示，由仿真结果可知，策略 1 和策略 2 切泵 3 轮，而策略 3 只进行了 2 轮切泵，在相同的切泵轮次下，策略 1 的频率出现明显的过切和二次跌落，且 Δf_m 和 t_s 较其他策略都比较大。

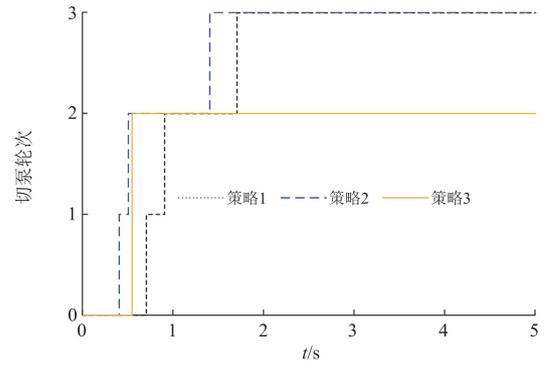
由表 9 可知，策略 2 的 Δf_m 较策略 1 降低了 26.3%， t_s 减少了 2.875 s， α 降低了 5.9%，通过对低频切泵策略改进，增强了系统频率稳定性，频率响应曲线有了明显的改善。策略 3 的 Δf_m 较策略 2 降低了 45.1%， t_s 减少了 0.589 s， α 降低了 56%，故



(a) 系统频率偏差



(b) 系统频率变化率



(c) 低频切泵动作结果

图 15 场景 2 低频切泵仿真结果

Fig. 15 Low frequency pump-shedding simulation results in Scenario 2

表 9 场景 2 下不同切泵策略调频指标

Table 9 Frequency regulation performance indicators under different pump-shedding strategies in Scenario 2

| 策略 | $ \Delta f_m /\text{Hz}$ | t_m/s | t_s/s | α |
|------|--------------------------|----------------|----------------|----------|
| 策略 1 | 0.914 | 1.8 | 11.531 | 0.51 |
| 策略 2 | 0.674 | 1.4 | 8.656 | 0.48 |
| 策略 3 | 0.37 | 1.8 | 8.067 | 0.21 |

VSPSU 自适应综合惯量频率控制能很好地改善系统频率性能，将两种策略结合可在降低切泵代价的同时使得频率曲线更稳定。

以上分析表明，通过将两种调频策略结合应用在电网调频中，当电网发生大功率缺额时，能有效改善频率超调和过切现象，降低系统最大频率偏差，减缓频率下降速度，缩短稳态频率恢复时间，能很好地适用于高比例新能源电力系统。

5 结论

针对高比例新能源接入造成的电力系统频率特性恶化，以及传统低频切泵方法不适用高比例新能源电力系统的问题，本文提出了变速抽水蓄机组自适应综合惯量控制策略及定速抽水蓄机组考虑短期 RoCoF 预测的低频切泵控制策略。通过分析研究，得出以下结论：

1) 通过自适应综合惯量控制对调频参数寻优，变速抽水蓄机组可在参与调频的同时，合理地利用转子动能，降低最大频率偏差及稳态频率恢复时间。在自适应控制中加入转速保护系数，通过转速约束机组有功出力，防止转速越限，仿真分析表明，该策略具有更好的调频性能，在一定程度上弥补了传统综合惯量控制的局限性。

2) 通过优化的低频切泵控制，切泵装置能提前

预测频率变化趋势，并通过频率变化趋势来判断是否进行加速切泵，改善了传统低频切泵可能导致的过切和切泵时机不合理的缺陷，提升了系统的频率稳定性。由仿真结果可知，将优化的低频切泵控制与变速抽蓄机组自适应综合惯量调频控制策略相结合，在系统发生大规模功率缺额的情况下，两种策略相互配合可很好地改善频率曲线，增强系统频率稳定性。

3) 结合抽水蓄能不同机组类型和不同运行工况，提出了抽水蓄能参与电网频率稳定控制的策略，验证了抽水蓄能在频率稳定控制中的重要作用，可为抽水蓄能参与电网频率调节提供策略支撑。

参考文献

- [1] 雷傲宇, 苏婷婷, 梅勇, 等. 基于分频器理论的新能源电网暂态频率稳定分析方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 132-140.
LEI Aoyu, SU Tingting, MEI Yong, et al. A transient frequency stability analysis method for new energy grid based on frequency divider theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 132-140.
- [2] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [3] 程杉, 傅桐, 李洋洋, 等. 含高渗透可再生能源的配电网灵活性供需协同规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 1-12.
CHENG Shan, FU Tong, LI Fengyang, et al. Flexible supply demand collaborative planning for distribution networks with high penetration of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 1-12.
- [4] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475.
- [5] 韩如磊, 樊子铭, 王粟, 等. 新型电力系统惯量支撑和调频响应特性典型建模综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(11): 67-83.
HAN Rulei, FAN Ziming, WANG Su, et al. Review of typical modeling for inertial support and frequency regulation response characteristics of new-type power system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(11): 67-83.
- [6] 赵心怡, 谢俊, 周翠玉, 等. 风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 121-129.
ZHAO Xinyi, XIE Jun, ZHOU Cuiyu, et al. A multi-time scale coordinated dispatching model of wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 121-129.
- [7] 薛福, 马晓明, 游焰军. 储能技术类型及其应用发展综述[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 48-58.
XUE Fu, MA Xiaoming, YOU Yanjun. Energy storage technologies and their applications and development[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 48-58.
- [8] 彭煜民, 刘德旭, 王雪林, 等. 计及水库运行约束的极端气象场景下抽蓄电站优化调度研究[J]. 水利学报, 2023, 54(11): 1298-1308.
PENG Yumin, LIU Dexu, WANG Xuelin, et al. Optimization scheduling of pumped-storage power stations under extreme weather scenarios considering reservoir operation constraints[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(11): 1298-1308.
- [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] 朱珠, 潘文霞, 刘铜锤, 等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 463-474.
ZHU Zhu, PAN Wenxia, LIU Tongchui, et al. Frequency response mechanism modeling and performance analysis of adjustable-speed pumped storage unit[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 463-474.
- [11] 陈亚红, 邓长虹, 刘玉杰, 等. 抽水工况双馈可变速抽蓄机组机电暂态建模及有功-频率耦合特性[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 942-957.
CHEN Yahong, DENG Changhong, LIU Yujie, et al. Electromechanical transient modelling and active power-frequency coupling characteristics of doubly-fed variable speed pumped storage under pumping mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 942-957.
- [12] 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.
- [13] 庄凯勋, 孙建军, 丁理杰, 等. 提升双馈变速抽水蓄能机组频率响应特性的控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(23): 6292-6304.

- CHUANG Kaihsun, SUN Jianjun, DING Lijie, et al. A control strategy with improved frequency response characteristics of variable speed DFIM pumped storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6292-6304.
- [14] SCHMIDT J, KEMMETMULLER W, KUGI A. Modeling and static optimization of a variable speed pumped storage power plant[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 38-51.
- [15] HUANG Yifan, YANG Weijia, ZHAO Zhigao, et al. Active power fluctuations and control in hydraulic disturbance of variable speed pumped storage plants[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106666.
- [16] JOSEPH A, DESINGU K, SEMWAL R R, et al. Dynamic performance of pumping mode of 250 MW variable speed hydro-generating unit subjected to power and control circuit faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(1): 430-411.
- [17] 周霞, 刘懿诗, 戴剑丰, 等. 考虑风-储-直参与调频的电力系统频率特征定量分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 30-44.
- ZHOU Xia, LIU Yishi, DAI Jianfeng, et al. Quantitative analysis of power system frequency characteristics considering wind power-energy storage-flexible HVDC transmission participation in frequency modulation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 30-44.
- [18] 李琳, 周霞, 罗剑波, 等. 适用于频率安全稳定的低频切泵及减载协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 26-31.
- LI Lin, ZHOU Xia, LUO Jianbo, et al. A coordination and optimization method for under frequency load shedding and pump shedding suiting frequency safety and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 26-31.
- [19] 陈兴华, 常东旭, 陈锦昌, 等. 基于蓄能切泵的南方电网低频综合稳定控制策略与应用[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 68-75.
- CHEN Xinghua, CHANG Dongxu, CHEN Jinchang, et al. Low frequency integrated stability control strategy and application of CSG based on pump storage cutting[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 68-75.
- [20] XU Zhenghua, DENG Changhong, YANG Qiuling. Flexibility of variable-speed pumped-storage unit during primary frequency control and corresponding assessment method[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2023, 145: 108691.
- [21] 陈亚红, 邓长虹, 武荷月, 等. 发电工况可变速抽水蓄机组模式切换过程多阶段柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5258-5274.
- CHEN Yahong, DENG Changhong, WU Heyue, et al. Multi-stage soft coordinated control of variable speed pumped storage unit in the process of mode conversion under the generation condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5258-5274.
- [22] MULIADI E, SINGH M, GEVORGIAN 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.
- [23] 高嵩, 李军, 宋辉, 等. 提升火电机组一次调频性能的火电-储能一体化系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 116-125.
- GAO Song, LI Jun, SONG Hui, et al. An integrated thermal power-energy storage system for improving primary frequency regulation performance of thermal power units[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 116-125.
- [24] 刘辉, 罗薇, 苏懿, 等. 计及RoCoF与转子动能的风电机组自适应下垂控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 161-169.
- LIU Hui, LUO Wei, SU Yi, et al. Adaptive droop control strategy for wind turbines based on RoCoF and rotor kinetic energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 161-169.
- [25] 孔芝, 杨青峰, 赵杰, 等. 基于自适应调整权重和搜索策略的鲸鱼优化算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 35-43.
- KONG Zhi, YANG Qingfeng, ZHAO Jie, et al. Adaptive adjustment of weights and search strategies-based whale optimization algorithm[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2020, 41(1): 35-43.
- [26] 盛四清, 赵文天, 樊茂森. 适应新能源高占比系统的低频减载优化方法[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 157-162.
- SHENG Siqing, ZHAO Wentian, FAN Maosen. Optimization method of UFLS for high proportion of new energy proportion system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(2): 157-162.
- [27] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
- WU Qifan, SONG Xinli, ZHANG Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836.

收稿日期: 2024-04-08; 修回日期: 2024-08-08

作者简介:

张萍(1979—), 女, 副教授, 研究方向为新能源电力系统建模与控制; E-mail: 415621328@qq.com

胡龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统频率稳定性控制。E-mail: 1507418400@qq.com

(编辑 周金梅)