抽水蓄能机组调频控制优化策略研究

陈　志，宋少群，黄金富，赖永生

（国网福建省电力有限公司调度控制中心，福建 福州 350003）

摘要：随着越来越多的新能源并网接入，研究交流励磁抽水蓄能机组的调频控制策略，充分发挥其快速功率调节能力，有利于维持电网的安全稳定运行。为此，针对传统综合惯性控制中下垂环和惯性环增益参数，对交流励磁抽水蓄能机组参与电力系统频率调节特性的影响进行分析，提出了变增益系数惯性环和下垂环分时参与调节的综合调频控制优化策略，并对其控制参数进行整定；建立了三机电力系统的仿真模型，将所提出综合调频控制优化策略与传统综合惯性控制策略进行仿真对比分析，充分验证了所提策略的有效性。

关键词：新能源并网；抽水蓄能；增益系数；改进控制；参数整定

Research on optimization strategy of frequency modulation control for pumped storage units

CHEN Zhi, SONG Shaoqun, HUANG Jinfu, LAI Yongsheng

(State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Dispatching Control Center, Fuzhou 350003, China)

Abstract: With more and more new energy being connected to the grid, studying the frequency control strategy of AC excitation pumped storage units and fully leveraging their fast power regulation ability is beneficial for maintaining the safe and stable operation of the power grid. To this end, the influence characteristics of the gain parameters of the droop loop and inertia loop in traditional integrated inertial control on the frequency regulation characteristics of AC excitation pumped storage units in the power system are analyzed. A comprehensive inertial frequency modulation improvement control strategy with variable gain coefficient inertia loop and droop loop time-sharing participation regulation is proposed, and its control parameters are adjusted; A simulation model of a three machine power system was established, and the effectiveness of the proposed integrated inertial frequency modulation improved control strategy was fully verified by comparing and analyzing it with the traditional integrated inertial control strategy.

Key words: new energy grid connection; pumped storage energy; gain coefficient; improve control; parameter tuning

0　引言

抽水蓄能作为新型电力系统的重要组成部分，对促进清洁能源消纳和电力系统优化运行具有重要意义[1]。研究抽水蓄能功能作用，明确其控制策略，不仅对抽水蓄能产业健康发展具有重要意义，而且为其他储能产业发展提供良好借鉴[2-3]。

目前，国内外关于交流励磁抽水蓄能机组的

国网福建省电力有限公司科技项目（B3130023000F）

研究主要集中在机组的建模及变流器和调速器控制方面。文献[4]对传统变速抽水蓄能机组抽水方向起动方式进行分析，基于模型参考自适应算法对转子转速和角度进行计算，采用定子绕组短接的方式进行机组自起动，有效降低了机组建造成本，同时实现了无位置传感器控制；文献[5]提出了一种带负荷软起动的控制方法，以定子磁链和转子转速为控制目标，使机组转速从零平滑上升至并网所需转速，在调速阶段根据功率需求确定水轮机的最优转速，以实现负荷优化调节；文献[6]对不同网架结构下抽水蓄能机组频率调节特性进行分析，基于PSCAD系统建立了可变速抽水蓄能机组仿真模型，基于ω-f曲线自适应整定PID控制器环节参数，实现了抽水蓄能机组对系统频率的实时调节控制；文献[7]针对抽水蓄能机组设定分级滤波中的频率分量参数，提出抽水蓄能频率控制策略，构建了含抽水蓄能机组的区域控制模型，仿真验证结果表明所提出的控制策略有利于提升区域频率恢复速度，具备强抗干扰能力。

本文针对交流励磁系统传统综合惯性控制中下垂环和惯性环增益参数，对交流励磁抽水蓄能机组参与电力系统频率调节特性的影响进行分析，提出了增益系数分时参与调节的综合调频控制优化策略，并对其控制参数进行整定。基于三机电力系统的仿真模型，对本文所提出的综合调频控制优化策略与传统综合惯性控制策略进行仿真对比分析，验证本文所提策略的有效性。

1 系统调频参数影响特性分析

1.1 基本理论分析

传统综合调频控制结构如图1所示。将机组调度指令功率加上功率微增量ΔP_{f}作为机组输出功率的参考值[8]，计算式为

$$\Delta P_{\mathrm{f}}=\Delta P_{\mathrm{f1}}+\Delta P_{\mathrm{f2}}=K_1\Delta f+K_2\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中，ΔP_{f1}为下垂环功率微增量；ΔP_{f2}为惯性环功率微增量；K_1、K_2分别为下垂环和惯性环增益参数。

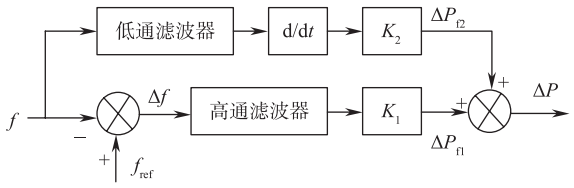


图1 传统综合调频控制结构

Fig. 1 Traditional integrated frequency modulation control structure

除了要考虑频率变化率小，还要尽量减少稳态频率以及最大频率偏差[9]。忽略负荷功率的影响，电力系统频率与功率关系可简化为

$$P_{\mathrm{L}}-P_{\mathrm{G}}=D_{总}\Delta f+H_{总}\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中，P_{L}为电力系统负荷吸收功率；P_{G}为发电机发出功率；$D_{总}$和$H_{总}$分别为电力系统总阻尼和总惯量。

1.2 影响特性研究

本文以系统负荷突增为例，对不同惯性环增益和下垂环增益单独作用时系统频率变化进行了仿真分析。

1.2.1 惯性环增益参数

令机组的下垂环增益参数为0，惯性环增益参数从0.03到0.15依次增加，得到惯性环与频率变化率的特性曲线如图2所示。

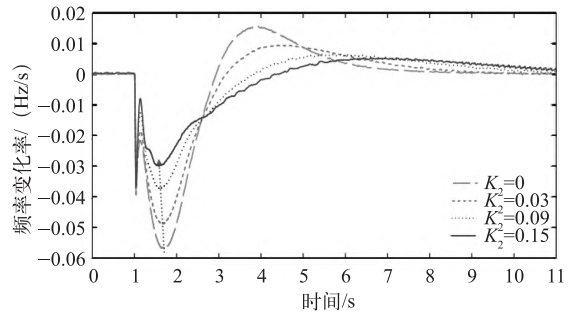


图2 惯性环与频率变化率的特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve of inertial loop and frequency change rate

从图2可看出，随着惯性环增益参数的增加，不会提升稳态频率偏差，但是会大幅减少调频初期的频率变化率，说明对调频初期维护频率稳定作用更大。

1.2.2 下垂环增益参数

令机组的惯性环增益参数为0，下垂环增益参数从1到5依次增加，得到下垂环与频率变化率的特性曲线如图3所示。

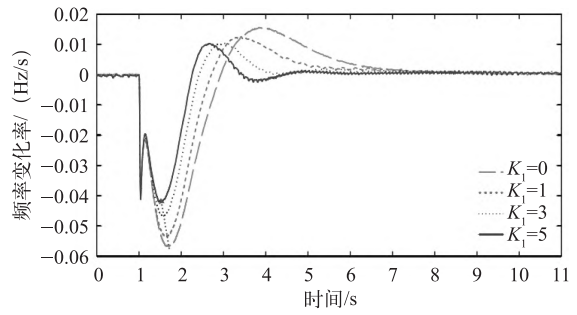


图 3　下垂环与频率变化率的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of droop loop and frequency change rate

从图3可看出，随着下垂环增益参数的增加，对调频初期的频率变化率抑制较小，但进入稳态的时间加快，说明对调频中后期维护频率稳定作用更大。

2　改进控制策略及参数整定

2.1　改进控制模型的建立

综合调频控制优化策略结构如图4所示。系统负荷突增时，系统频率上升，$\Delta f>0$，ΔP_{f1}和ΔP_{f2}均大于0，为保证调频初期的惯性环以及调频中后期的下垂环能够发挥作用，令$\Delta P_f=\max\{\Delta P_{f1},\Delta P_{f2}\}$。此外，建立了惯性环增益参数$K_2'$与转子转速的自适应关系，并根据机组备用功率整定下垂环增益参数值K_1'，加入转速越限保护，防止在调频中后期过度释放转子动能。

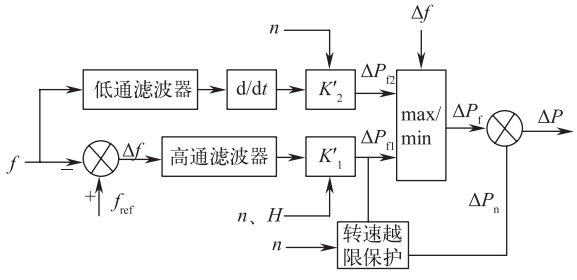


图 4　综合调频控制优化策略结构图

Fig. 4 Structure diagram of comprehensive frequency modulation control optimization strategy

2.2　控制参数的整定

当转子角速度ω_r变化时，机组释放的有功功率为[10]

$$\begin{cases} H=\dfrac{E_k}{S}=\dfrac{J\omega_r^2}{2S} \\ \Delta P^*=2H\omega_r^*\dfrac{\mathrm{d}\omega_r^*}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{3}$$

惯性环功率微增量表达式为

$$\Delta P_{f2}=\pm K_2'\frac{\mathrm{d}f^*}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中，J为机组总转动惯量；S为机组视在功率；*表示标幺值；抽水工况系数K_2'取正。

建立机组转速与系统频率的关系为

$$K_2'=\frac{H(\omega_r^{*2}-\omega_M^{*2})}{f_0^*-f_M^*}=\frac{H(n^{*2}-n_M^{*2})}{f_0^*-f_M^*} \tag{5}$$

式中，ω_M及n_M分别为机组转子角速度及机组转速极限值；n为机组转速；f_0^*为电力系统稳态频率；f_M为电力系统允许的最大频率偏差。

根据我国电网规定，稳态频率偏差为±0.2 Hz[11]，负荷突增时

$$K_1'=\frac{\Delta P_{f1}}{\Delta f}=\frac{P_N-P_0}{0.2} \tag{6}$$

式中，P_0为机组输出功率；P_N为机组最大输出功率。

机组转速调节范围为±10%，转速越限保护功率微增量ΔP_n为[12]

$$\Delta P_n=\begin{cases} -\Delta P_{f1}, n\leqslant 0.9 \\ -\Delta P_{f1}\dfrac{\exp(n\beta)-\exp(0.91\beta)}{\exp(0.9\beta)-\exp(0.91\beta)}, 0.9\leqslant n\leqslant 0.91 \\ 0, 0.91\leqslant n\leqslant 1.09 \\ -\Delta P_{f1}\dfrac{\exp(n\beta)-\exp(1.09\beta)}{\exp(1.1\beta)-\exp(1.09\beta)}, 1.09\leqslant n\leqslant 1.1 \\ -\Delta P_{f1}, 1.1\leqslant n \end{cases} \tag{7}$$

3　算例仿真分析

为了验证本文所提出交流励磁抽水蓄能机组综合调频控制优化策略的有效性，搭建了仿真模型如图5所示。该电力系统中各机组参数见表1，各参量均采用标幺值表示。

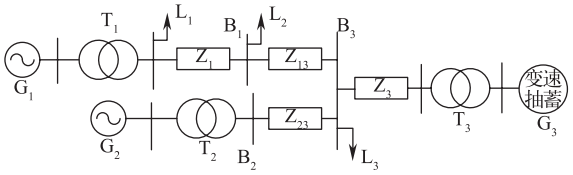


图 5　仿真结构图

Fig. 5 Simulation structure diagram

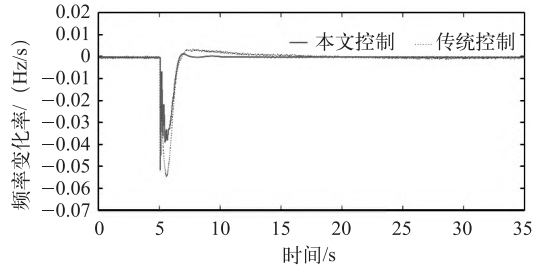
表 1　各机组参数

Tab. 1 Traditional integrated frequency modulation control structure

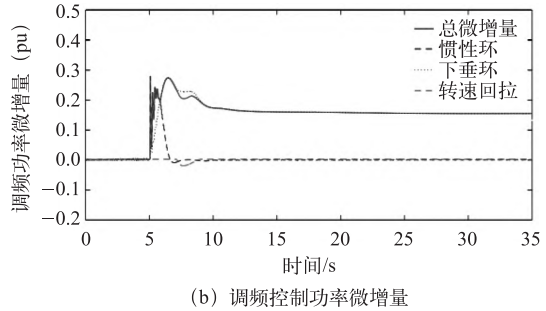
系统组成	名称	容量 /MW	功能说明
常规火电厂	G_1	1 000	具有一次调频功能
	G_2	700	0.6(pu) 恒定有功
抽水蓄能电站	G_3	300	-
集中有功负荷	L_1	300	-
	L_2	500 /170	发电 / 抽水工况
	L_3	560	-

交流励磁抽水蓄能机组分别采用本文控制策略和传统综合惯性控制策略，在机组抽水工况下，对系统负荷突增场景进行仿真对比分析。

t=5 s时，系统负荷L_3由300 MW突增至430 MW，系统频率跌落，仿真结果如图6所示，频率跌落最低值及频率变化率最大值对比见表2。



（a）系统频率变化率波形



（b）调频控制功率微增量

图 6　仿真特性对比

Fig. 6 Comparison of simulation characteristics

表 2　不同工况特性对比

Tab. 2 Comparison of characteristics under different working conditions

工况类型	惯性调频改进控制	传统综合惯性调频
频率跌落最低值 /Hz	49.879	49.811
频率变化率最大值 /（Hz/s）	0.037 9	0.051 8

由表2可看出，本文所提改进控制策略相比于传统控制策略，频率变化率最大值减少了26%。从图6中可看出，系统负荷突增时，调频初期惯性环功率微增量大于下垂环功率微增量，因而调频总功率微增量等于惯性环功率微增量，随着转子动能的减少，惯性环功率微增量逐渐减小，当小于下垂环功率微增量时，调频总功率微增量等于下垂环功率微增量，下垂环节单独作用时，因转子动能释放过多导致机组转速靠近最低值，因而转速越限保护起作用，将转速拉回运行范围，有效地防止机组失速，验证了本文综合惯性调频控制策略在系统突增负荷时的有效性。

4　结束语

本文所提出的综合调频控制优化策略实现了变转速抽水蓄能机组参与系统频率调节的优化控制目标，相比于传统控制策略，建立了惯性环增益参数与机组转子的动能关系，在机组调频初期提供较大惯性响应，有效减少系统频率变化率；建立了下垂环增益与机组备用功率的联系，充分利用机组备用功率，减少系统暂态频率偏差及稳态频率偏差，同时，转速越限保护控制有效防止机组下垂环单独作用时机组失速。

参考文献

[1] 赵毅锋．抽水蓄能机组智能状态评价技术研究[J]．水电与抽水蓄能，2022，8(3)：4．

[2] 黄汉权，赵宏，翟大伟．抽水蓄能成本补偿机制及成本影响因素研究[J]．价格理论与实践，2022(2)：12-19．

[3] 关明．变速抽水蓄能机组参与含风电电网的调频控制研究[D]．吉林：东北电力大学，2023．

[4] 倪晋兵，张云飞，施浩波，等．基于时序生产模拟的抽水蓄能促进新能源消纳作用量化研究[J]．电网技术，2023，47(7)：2799-2809．

[5] 谢宁宁．交流励磁抽水蓄能机组最优功率控制及参与调频策略研究[D]．重庆：重庆大学，2022．

[6] 乔照威，孙玉田，戈宝军．可变速抽水蓄能发电电动机功率特性分析[J]．大电机技术，2022(3)：8-13．

[7] 余顺坤，宋宇晴．基于变分自编码器-物元分析法的抽水蓄能电站效能综合评价[J]．现代电力，2022，39(3)：295-301．

[8] 蒋亚俊．抽水蓄能机组健康状态评估与性能退化趋势预测研究[D]．郑州：河南工业大学，2022．

[9] 赵坤杰．一次调频工况下抽水蓄能机组频率振荡特性与优化调节研究[D]．武汉：华中科技大学，2022．

[10] 汪致洵，方仍存，詹智红，等．新型电力系统下抽水蓄能电站的价格机制及影响研究[J]．中国电力企业管理，2022(10)：68-70．

[11] 董海洋，衣传宝，王龙．基于新型电力系统条件下抽水蓄能电站静止变频器配置台数的优化研究[J]．水电与抽水蓄能，2022，8(1)：4-6，28．

[12] 刘天宝．电力市场条件下抽水蓄能电站经济效益的评价研究[D]．保定：华北电力大学，2008．

作者简介

陈志（1970—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向：电力系统生产运行及电力市场管理。

宋少群（1979—），男，博士，高级工程师，主要研究方向：电力系统生产运行及电力现货市场管理。

黄金富（1973—），男，本科，高级工程师，主要研究方向：电力系统调度管理。

赖永生（1981—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向：电力市场运营管理。

（收稿日期：2023-09-15）