

面向超低频振荡的水电调速器与 SVC 附加 频率控制参数联合优化

郭亮¹, 赵静¹, 邓志森¹, 杨小磊¹, 史华勃², 吕飞鹏³, 王渝红³, 李沛阳³

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 互联电网超低频振荡抑制对系统安全稳定运行至关重要, 现有研究仅考虑水电调速器 PI 控制参数优化的措施, 可能导致水电调频能力降低。随着电网中静止无功补偿器 (SVC) 数量的显著增长, 通过 SVC 附加频率控制为超低频振荡抑制提供了新的思路, 于是提出了一种 SVC 附加频率控制与水电调速器 PI 参数联合优化方法。首先, 建立了包含水轮机和 SVC 的单机单负荷系统等值模型, 分析 SVC 的附加频率控制原理, 并分析所提模型对系统超低频振荡的抑制作用; 在此基础上, 以超低频振荡阻尼系数和水电机组一次调频性能为优化目标, 通过优化设计控制器参数以提升系统整体的超低频振荡抑制能力; 最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了水电机组和 SVC 仿真模型, 对所提方法进行有效性验证。仿真结果表明, 该方法可有效提升高比例水电电网超低频振荡阻尼能力, 同时提升水电机组调频能力。

关键词: 水电调速器; SVC 附加频率控制; 超低频振荡; 调频能力

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)03-0017-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240304

Joint Optimization of Hydroelectric Governor and SVC with Additional Frequency Control Parameters for Ultra-low Frequency Oscillation

GUO Liang¹, ZHAO Jing¹, DENG Zhisen¹, YANG Xiaolei¹, SHI Huabo²,
LYU Feipeng³, WANG Yuhong³, LI Peiyang³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Ultra-low frequency oscillation suppression of interconnected power grid is crucial for safe and stable grid operation. The existing studies only consider optimizing the PI control parameters of hydroelectric governor, which may reduce the hydroelectric frequency regulation capability. The significant growth of static var compensators (SVC) in power grid introduces a new idea for ultra-low frequency oscillation suppression. A method to jointly optimize SVC with additional frequency control and PI parameters of hydroelectric governors is proposed. Firstly, an equivalent model of a single-machine single-load system is established, which contains a hydraulic turbine and SVC. The principle of SVC with additional frequency control and its suppression effect on ultra-low frequency oscillation of system are analyzed. On this basis, taking damping coefficient of ultra-low frequency oscillation and primary frequency regulation performance of hydropower units as optimization objectives, the controller parameters are optimally designed to improve the overall capability of ultra-low frequency oscillation suppression. Finally, a simulation model for the hydropower units and SVC is constructed on PSCAD/EMTDC platform, which verifies the effectiveness of the proposed method. The simulation results show that the proposed method can effectively improve the damping capacity of ultra-low frequency oscillations in power grid with high proportion of hydropower, and can also improve the frequency regulation capability of hydropower units.

Key words: hydroelectric governor; SVC with additional frequency control; ultra-low frequency oscillation; frequency regulation capability

0 引言

电网互联是增强电力安全可靠供应、促进可再生能源高效消纳、提高系统运行经济性的重要手段^[1-2]。然而,电网异步互联后,电网的功率平衡和稳定特性发生了较大的变化,这与电网内部的电源特性、网架结构和负荷特性等相关^[3-4]。以西南电网或云南电网为例,西南地区具有丰富的水电资源,自从云南电网与南方电网主网异步联网后^[5],虽然跨区域的低频振荡问题得到缓解,但当区域电网的水电比例过高时,受扰动后容易出现振荡频率比低频振荡更低的超低频振荡现象^[6-8]。因此,亟需提出有效的措施来抑制异步联网后的超低频振荡现象,以维持电网的安全稳定运行。

现有研究表明超低频振荡主要是由异步联网后部分水电机组调速系统和原动机系统水锤效应共同作用下的负阻尼特性引起的电网扰动导致的现象^[9-10]。异步联网后,由于转动惯量的下降,系统内发电机组调速器需要更加快速地调整机组的有功功率,系统快速频繁的调频导致超低频振荡现象更加严重^[11],影响了电网的安全稳定运行。针对超低频振荡的抑制措施,部分学者采用优化水电调速器参数的方式来减小负阻尼效应,通过有效的优化算法得到调速器 PI 参数。文献[12]提出了一种通过提升调速器阻尼抑制超低频振荡的参数优化方法,但忽略了调速器对一次调频性能的影响,无法满足系统对一次调频的要求。针对这一问题,文献[13]考虑了调速器对一次调频性能的影响,探究了死区限幅对超低频振荡现象的影响机理,并提出基于粒子群的多目标优化策略,能够在改善调速系统阻尼特性的同时提升一次调频的动态响应性能。但上述两种方法主要适用于发电机单机带小负荷或孤网运行的工况。为了提高优化调速器参数方法的适用性,文献[14]提出了一种针对多机系统的调速器参数优化方法,保证了多机系统的稳定性。

异步联网系统中,仅依靠水电调速器的参数优化以抑制超低频振荡可能因水电机组运行工况限制等原因,无法完全抑制超低频振荡。随着电网中静止无功补偿器(static var compensator, SVC)数量的显著增长,通过 SVC 附加频率控制为超低频振荡抑制提供了新的思路。

由于 SVC 附加频率控制的直流能够提供正阻尼,许多学者利用 SVC 附加频率控制来抑制振荡。针对 SVC 的结构和原理,文献[15]建立了 SVC 附加控制模型,并设计了附加阻尼控制器,详细阐述了提高系统阻尼特性的基本原理,但未考虑电压控制与附加阻尼控制作用间的交互关系。为了保证系统电压的稳定运行,文献[16]对纯电压型控制器进行了改进,设计出了既有维持装设点电压水平能力,又能显著增加系统阻尼的信号调制型 SVC 综合非线性控制器。然而,文献[15-16]未给出较好的控制参数优化方法。针对这一问题,文献[17]采用遗传算法对控制器参数进行进化,在全局信号中搜索出最优解,并提出了衡量系统低频振荡非线性度的参数设计方法。文献[18]采用粒子群优化算法对控制器参数进行自适应优化,并选择合适的阻尼控制输入信号对控制信号进行相位补偿。

目前,较少有研究考虑水电机组调速器和 SVC 联合优化方法。因此,下面提出一种水电调速器与 SVC 附加频率控制参数联合优化方法。该方法综合考虑调速器参数和 SVC 附加频率控制参数的优化,以超低频振荡阻尼和一次调频性能为优化指标,通过优化设计控制器参数以提升系统整体的超低频振荡抑制能力。首先,介绍了含 SVC 的系统模型,分析了 SVC 附加频率的控制原理;然后,对超低频振荡特性以及 SVC 抑制超低频振荡的原理进行分析,提出了一种 SVC 附加频率控制参数与水电调速器 PI 参数联合优化方法;最后,通过仿真分析对所提优化方法进行了有效性验证。

1 系统模型介绍

1.1 含 SVC 的单机单负荷系统模型

建立如图 1 所示的含水轮机和 SVC 的单机单负荷系统。

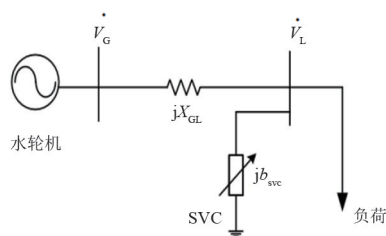


图 1 含水轮机和 SVC 的单机单负荷系统
发电机转子运动方程的模型^[6]为

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - 1) \quad (1)$$

式中: ω 为发电机转速; T_J 为发电机惯性时间常数; P_m 、 P_e 分别为发电机的机械功率、电磁功率; D 为阻尼系数。

负荷有功功率的静态模型可表示为

$$P_L = P_0 [a (V_L/V_0)^2 + b (V_L/V_0) + c] \quad (2)$$

式中: P_L 、 V_L 分别为负荷节点的有功功率、电压幅值; P_0 、 V_0 分别为稳态运行时负荷节点的有功功率、电压幅值; a 、 b 、 c 分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷的比例系数,且 $a+b+c=1$ 。

1.2 SVC 的附加频率控制原理

SVC 的控制框图如图 2 所示,其动态模型如式(3)所示。

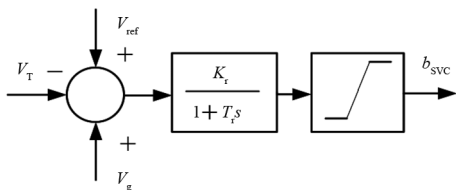


图 2 SVC 控制

$$T_r \frac{db_{SVC}}{dt} = -b_{SVC} + K_r (V_{ref} - V_T + V_g) \quad (3)$$

式中: b_{SVC} 为 SVC 的等效输出电纳; K_r 为控制器测量环节的增益; T_r 为时间常数, V_{ref} 为参考电压; V_T 为 SVC 控制节点的测量电压; V_g 为 SVC 附加阻尼控制信号。

用于抑制超低频振荡的 SVC 附加阻尼控制器由隔直环节、移相环节、比例环节和限幅环节组成,结构如图 3 所示,传递函数如式(4)所示。

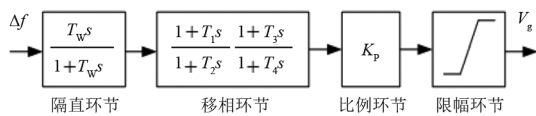


图 3 SVC 附加阻尼控制器结构

$$G_{FC}(s) = k_{psvc} \frac{T_w s}{1 + T_w s} \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s} \frac{1 + T_3 s}{1 + T_4 s} \quad (4)$$

式中: k_{psvc} 为比例环节增益; T_w 为隔直环节时间常数; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为移相环节时间常数,一般取 $T_1 = T_3$ 、 $T_2 = T_4$ 。

2 超低频振荡抑制与调频能力

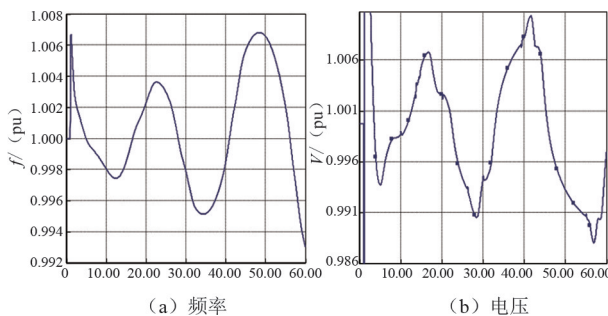
2.1 超低频振荡特性

为了分析水电超低频振荡特性,基于图 1 给出

的单机带负荷系统,在 PSCAD/EMTDC 平台搭建水电机组和 SVC 仿真模型,参数如表 1 所示。超低频振荡发生时,系统频率发生长时间大幅振荡。超低频振荡研究相关文献主要关注系统频率的振荡。实际上当负荷具有电压调节效应时,超低频振荡发生时系统电压也会发生不同程度的超低频振荡。仿真结果如图 4 所示,超低频振荡发生时,系统频率、电压均发生振荡频率 0.035 Hz,阻尼比为-0.16 的超低频振荡。

表 1 系统关键参数

机组	S/MVA	T_J/s	T_w/s
	183	8.37	1.47
负荷	P/MW	Q/Mvar	特性
	100	30	恒阻抗
SVC	Q/Mvar	类型	
	±60	TCR+FC	



(a) 频率 (b) 电压

图 4 超低频振荡现象

2.2 超低频振荡抑制和调频能力的关系

为了抑制超低频振荡,调速器可以根据电网频率或负荷的变化,通过调整控制器参数来改变发电机组的输出响应,使系统恢复有功功率平衡。采用适当的优化算法对调速器参数进行优化,可提升系统的超低频段阻尼水平,从而增强调速器对超低频振荡的抑制作用。

调频能力是指系统能够在负荷变化或系统扰动情况下维持稳定的频率,即一次调频性能。为了抑制超低频振荡,提高超低频段阻尼水平会减小调速器的输出响应速度,从而影响系统的一次调频性能。

由此可见,超低频振荡抑制与调频能力较难同时改善。调速器参数减小可以抑制超低频振荡,但调频能力将显著下降。因此,在进行调速器参数调整时,需要权衡超低频振荡抑制和调频能力之间的矛盾关系,根据具体的系统需求和稳定性要求来确定最优参数设定。

2.3 SVC 抑制超低频振荡原理

结合调速系统、发电机、负荷及 SVC 附加阻尼控制,可得如图 5 所示的 SVC 附加阻尼控制对低频影响机理示意图。图中, G_{FC} 为 SVC 附加阻尼控制的传递函数; G_{qsvc} 为 SVC 输入电压信号到输出无功功率 ΔQ 的传递函数。

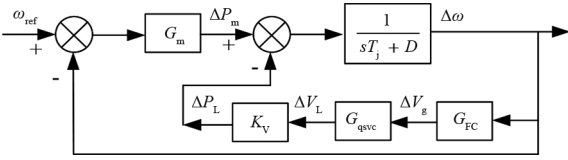


图 5 SVC 附加阻尼控制对低频影响机理

对于图 5 所示系统,可得负荷功率偏差与频率偏差之间的传递函数为

$$\begin{aligned} G(j\omega_d) &= \Delta P_L / \Delta \omega \\ K_D &= \text{Re } G(j\omega_d) \\ K_S &= \text{Im } G(j\omega_d) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ω_d 为振荡频率; K_D 为负荷功率的阻尼转矩分量; K_S 为同步转矩分量。因此,当负荷具有电压调节效应时, SVC 附加阻尼控制,将系统频率引入无功电压控制,通过电压与有功功率耦合将影响超低频振荡特性。SVC 附加阻尼控制使得 K_D 为正,则有利于振荡抑制。

因此,如图 3 所示,当系统发生超低频振荡时, SVC 附加频率控制器以系统频率偏差 Δf 为输入,输出附加控制信号 V_g 至 SVC,改变 SVC 等效输出电纳 b_{svc} ,从而调节负荷电压 V_L 。当负荷具有电压调节效应时, V_L 的变化会改变负荷的有功功率 P_L ,进而改变发电机的电磁功率 P_e ,使得 SVC 附加频率控制为超低频振荡提供正阻尼,最终实现对系统超低频振荡的控制。

3 调速器与 SVC 附加频率控制参数优化

3.1 优化目标

SVC 附加频率控制能对电网频率产生影响,主要与附加控制的参数设置有关。水电调速器对超低频振荡抑制能力和调频能力主要与调速器频率控制环 PI 参数相关。因此,为了在抑制超低频振荡的同时提升系统调频能力,提出了如式(6)所示的优化目标函数。

$$J_1(\mathbf{K}) = \frac{1}{D_1(f)}, D_1(f) > 0, D_1(f) > D_0(f) \quad (6)$$

$$J_2(\mathbf{K}) = T_s \quad (7)$$

式中: $\mathbf{K} = [k_p, k_i, T_1, T_2, k_{psvc}]$ 为调速器和 SVC 附加频率控制参数向量,其中, k_p, k_i 为调速器参数, k_{psvc} 、 T_1, T_2 为 SVC 参数; $D(f)$ 为 SVC 接入单机带负荷系统超低频振荡模态阻尼系数,下标 0 和 1 表示优化前后的阻尼系数; T_s 为自频差超出一次调频死区开始至机组有功功率达到稳定所经历的时间; $J_1(\mathbf{K})$ 为超低频振荡阻尼指标; $J_2(\mathbf{K})$ 为水电机组一次调频性能指标。SVC 附加频率控制与调速器参数优化综合目标函数 $J(\mathbf{K})$ 为

$$J(\mathbf{K}) = k_1 J_1(\mathbf{K}) + k_2 J_2(\mathbf{K}) \quad (8)$$

式中, k_1, k_2 分别为系统阻尼水平和一次调频性能指标的权重系数。

3.2 优化流程

SVC 附加频率控制与调速器参数联合优化流程如图 6 所示。

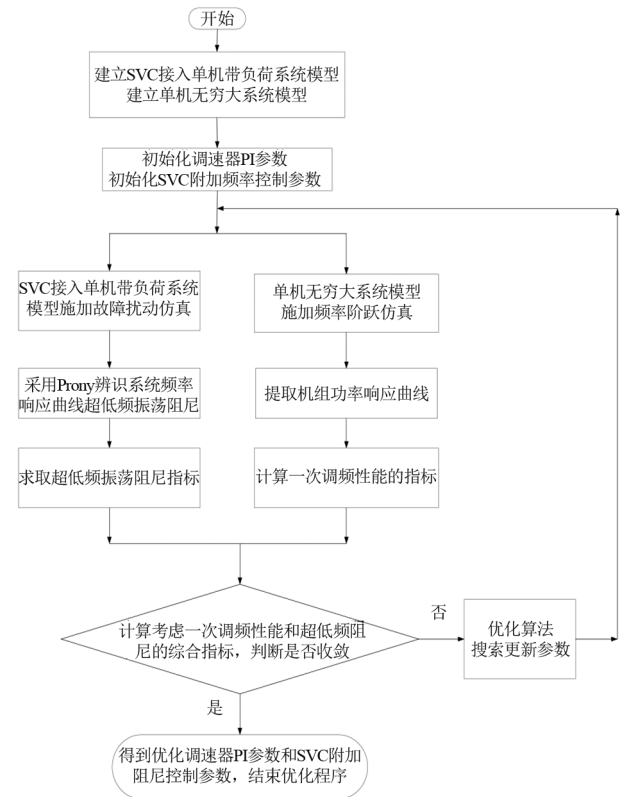


图 6 SVC 附加频率控制与调速器参数联合优化流程

1) 首先建立 SVC 接入单机带负荷系统模型以及单机无穷大系统模型,并初始化调速器和 SVC 附加频率控制参数。

2) 对 SVC 接入单机带负荷系统模型施加故障

中长期运行策略研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 317-325.

- [9] 许彦平, 黄越辉, 李湃, 等. 计及优先级及电力平衡的新能源中长期交易电量分解方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 117-125.
- [10] 徐帆, 谢旭, 施磊, 等. 电力中长期市场基数偏差电量处理方法分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 186-191.
- [11] 何蕾, 包铁, 刘闯, 等. 可再生能源年度合同电量优化分解及滚动修正算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(11): 56-65.
- [12] 赵书强, 胡利宁, 田捷夫, 等. 基于中长期风电光伏预测的多能源电力系统合约电量分解模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 13-19.
- [13] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4):

360-366.

- [14] 田海青, 郭金辉, 周瑜, 等. 基于合作博弈模型的新能源参与电力交易的调控策略[J]. 现代电力, 2022, 39(6): 640-648.
- [15] 四川电力交易中心. 2023年四川电力市场结算细则[R]. 成都: 四川电力交易中心, 2023.

作者简介:

张晋磊(1977), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
付春立(1973), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
唐志均(1984), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
张思逸(2000), 男, 高级工程师, 从事新能源管理工作;
杜锡力(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场、新能源与储能规划运行技术;
王允祥(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车有序充放电。

(收稿日期: 2024-01-07)

(上接第 21 页)

- [5] 江崇熙, 周靖皓, 石鹏, 等. 考虑超低频振荡的水轮机调速器参数多目标鲁棒设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 125-131.
- [6] 贺静波, 张剑云, 李明节, 等. 直流孤岛系统调速器稳定问题的频域分析与控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 137-143.
- [7] 路晓敏, 陈磊, 陈亦平, 等. 电力系统一次调频过程的超低频振荡分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 64-70.
- [8] 付超, 柳勇军, 涂亮, 等. 云南电网与南方电网主网异步联网系统试验分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 1-5.
- [9] 张建新, 刘春晓, 陈亦平, 等. 异步联网方式下云南电网超低频振荡的抑制措施与试验[J]. 南方电网技术, 2016, 10(7): 35-39.
- [10] 史华勃, 陈刚, 丁理杰, 等. 兼顾一次调频性能和超低频振荡抑制的水轮机调速器 PID 参数优化[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 221-226.
- [11] 贺子润. 水电高占比电网超低频振荡机理分析与抑制方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [12] CHEN G, TANG F, SHI H B, et al. Optimization strategy of hydro-governors for eliminating ultra low frequency oscillations in hydro-dominant power systems [J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3): 1086-1094.
- [13] 牛梓宇. 水电直流孤岛系统超低频振荡分析及调速器参数优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [14] WANG G T, XU Z, GUO X Y, et al. Mechanism analysis and suppression method of ultra-low-frequency oscillations

caused by hydropower units[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 103: 102-114.

- [15] 李洋. 应用 SVC 的附加控制抑制新疆皇林线低频振荡的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [16] 马幼捷, 陈寿孙, 张宝霖. SVC 非线性控制对改善电力系统稳定的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1994(4): 1-8.
- [17] 赵士正, 李雪峰, 蔡卫江. 基于遗传算法的 SVC 电力系统低频振荡抑制技术[J]. 甘肃科学学报, 2021, 33(3): 148-152.
- [18] 蔡卫江, 李雪峰, 赵士正. 基于粒子群算法的 SVC 抑制阻尼系统振荡控制器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 60-65.

作者简介:

郭亮(1982), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
赵静(1982), 女, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
邓志森(1978), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
杨小磊(1985), 男, 高级工程师, 从事电力系统调度自动化工作;
史华勃(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制;
吕飞鹏(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为继电保护和智能变电站;
王渝红(1971), 女, 博士, 教授, 研究方向为高压直流输电、新能源并网等;
李沛阳(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网。

(收稿日期: 2024-01-12)

扰动仿真,通过 Prony 等方法辨识系统超低频振荡阻尼。

3)对单机无穷大系统模型施加频率阶跃仿真,提取机组一次调频功率响应性能指标。

4)计算考虑一次调频性能和超低频阻尼的综合指标,判断是否收敛。若不收敛,更新相关控制参数,返回步骤2直至收敛。收敛后可得优化后的相关控制参数。

4 有效性验证

4.1 超低频振荡抑制效果

以图1所示的含 SVC 附加频率控制的单机带负荷系统为例,采用上述优化算法对 SVC 附加频率控制和调速器 PI 参数进行优化。在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建水电机组和 SVC 仿真模型,系统的关键参数如第2.1节表1所示,其中调速器采用 PSASP7 型调速器模型,工作于开度模式。

优化前后调速器和 SVC 附加控制参数如表2所示。表中:①为调速器原始参数;②为仅减小调速器参数;③为仅增大调速器参数;④为采用所提出的 SVC 附加频率控制与调速器参数联合优化,实际上是在引入 SVC 附加频率控制后,增大调速器参数。

表2 优化前后控制参数

	优化状态	k_p	k_i	k_d
调速器	①	3.0	1.0	0
	②	2.5	0.5	0
	③	4.0	1.5	0
SVC 附加控制	优化状态	T_1	T_2	k_p
	④	2	0.1	30

超低频振荡抑制效果对比如图7所示,可见通过直接减小调速器 PI 参数和 SVC 附加频率控制均可抑制超低频振荡,采用所提联合优化方法后超低频振荡抑制效果可能较直接采用减小调速器参数效果弱,主要原因在于增大了调速器参数。

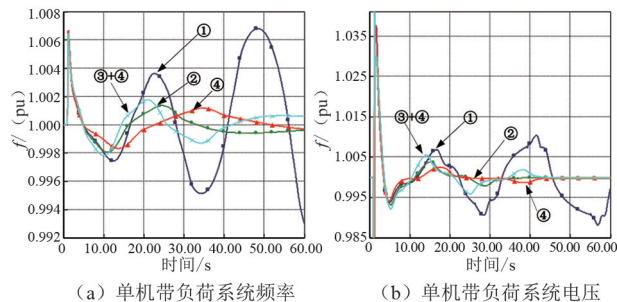


图7 超低频振荡抑制效果

4.2 一次调频性能

将表1中的机组接入无穷大系统,在调速器频率参考上施加 0.2 Hz 上阶跃信号,考察机组一次调频功率响应性能,如图8所示。可见,直接减小调速器 PI 参数机组的一次调频性能将严重削弱,一次调频功率调节时间从 20 s 延长到超过 30 s。采用联合优化方法后机组一次调频功率调节时间从 20 s 缩短到 15.6 s,显著提升了机组调频性能。

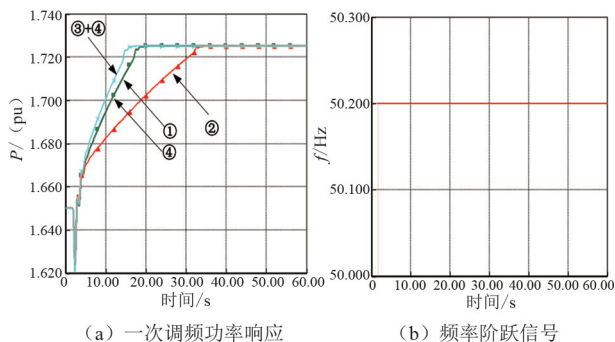


图8 一次调频性能

5 结论

上面分析了 SVC 附加频率控制对超低频振荡抑制作用,提出了 SVC 附加控制与水电调速器参数联合优化方法。研究表明,减小调速器参数抑制超低频振荡同时会严重削弱调频能力。在考虑负荷电压调节效应后,通过 SVC 附加频率控制也可抑制超低频振荡。通过 SVC 附加频率控制与水电调速器参数联合优化后,在确保超低频振荡有效抑制同时,可提升系统一次调频性能。

参考文献

- [1] 王宝财,孙华东,李文锋,等. 考虑频率稳定的电力电子电源频率控制参数优化方法[J]. 电网技术,2023,47(5):1751-1762.
- [2] 王淋,巨云涛,吴文传,等. 面向频率稳定提升的虚拟同步化微电网惯量阻尼参数优化设计[J]. 中国电机工程学报,2021,41(13):4479-4490.
- [3] 左剑,谢平平,李银红,等. 基于智能优化算法的互联网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报,2018,33(3):478-489.
- [4] 刘勤,余锐,张宇栋,等. 高水电占比电网频率振荡抑制技术工程实践及展望[J]. 电网技术,2022,46(10):3840-3848.