

DOI:10.11784/tdxbz202105002

水光互补发电系统超低频振荡抑制控制策略研究

许寅¹, 王佳璇¹, 吴翔宇¹, 王思家¹, 陈刚²

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 成都 610041)

摘要: 针对水电高占比的水光互补系统中存在的振荡频率低于 0.1 Hz 的超低频振荡问题, 提出了两种振荡抑制控制策略。首先, 对由水轮机和调速器构成的开环系统进行了阻尼转矩分析, 得出水轮机和调速器的负阻尼效应是造成超低频振荡的主要原因。其次, 为了补偿负阻尼效应造成的相位滞后, 提出水电机组调速器串联校正控制方法, 并通过阻尼转矩分析证明串联校正可以有效改善超低频段的阻尼特性; 构建了串联校正控制参数优化整定模型, 利用粒子群优化算法求解控制参数。然后, 利用光伏有功功率对系统频率的调节能力, 提出了光伏有功附加控制器, 并通过理论分析证明了光伏附加控制可以提升系统阻尼; 考虑到光伏出力的间歇性和波动性, 进一步设计了自适应调节系数以适应光伏特性。最后, 通过基于 PSCAD/EMTDC 平台构建的四川省某地区水光互补系统仿真模型对控制方法进行了测试: 在水电机组中加入串联校正环节, 对系统频率进行对比分析, 验证了串联校正控制对超低频振荡的抑制效果; 在光伏中加入有功附加控制器, 对比分析了光伏预留不同比例出力的情况下对超低频振荡的抑制效果, 预留比例越大时抑制效果越好, 但需要兼顾光伏发电的经济性以充分利用光伏容量。仿真结果表明, 本文所提的两种控制方法对超低频振荡均有较好的抑制效果。

关键词: 水光互补; 振荡抑制; 阻尼转矩分析; 超低频振荡; 水锤效应

中图分类号: TM622

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1248-10

Suppression Control Strategy of Ultra-Low Frequency Oscillation in Hydro-PV Complementary Generation System

Xu Yin¹, Wang Jiaxuan¹, Wu Xiangyu¹, Wang Sijia¹, Chen Gang²

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: To solve the ultra-low frequency oscillation problem (less than 0.1 Hz) in hydro-PV complementary systems with a high proportion of hydropower, two oscillation suppression strategies are proposed. First, a damping torque analysis was conducted for the open-loop model of the turbine and governor, where it was concluded that the negative damping effect of the turbine and governor is the leading cause of ultra-low frequency oscillation. Second, to compensate for the negative-damping induced lagging, a series correction control method for the governor of the hydropower units is proposed. The damping torque analysis proved that series correction could improve the damping characteristics of the ultra-low frequency band. A series-correction optimal control parameter tuning model was developed by employing particle swarm optimization for finding the control parameters. Next, based on the ability of active photovoltaic power to regulate the system frequency, an additional photovoltaic active power controller is proposed. The motion equation and damping torque analysis of the generator showed that the additional photovoltaic control could increase the damping of the system frequency oscillation. Owing to the fluctuation of photovoltaic outputs, the local adaptive adjustment coefficient was designed to adapt to the fluctuation characteristics of the photovoltaic.

收稿日期: 2021-05-01; 修回日期: 2021-06-17.

作者简介: 许寅 (1986—), 男, 博士, 教授, xuyin@bjtu.edu.cn.

通信作者: 吴翔宇, wuxiangyu@bjtu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905200); 国家自然科学基金资助项目(51807005).

Supported by the National Key R & D Program of China(No. 2018YFB0905200), the National Natural Science Foundation of China (No. 51807005).

Finally, the actual hydro-PV complementary system simulation in PSCAD/EMTDC at a particular Sichuan Province area was considered a test case. A series correction link was added to the hydropower units to compare and analyze the system frequency. The suppression effect of the series-correction control on the ultra-low frequency oscillation was discussed. By employing an additional active power controller to the photovoltaic system, the suppression effect on ultra-low frequency oscillation was compared and analyzed under different proportions of reserved photovoltaic output. The larger the reserved proportion, the better the suppression effect. However, the economics of photovoltaic power generation should be considered to avoid wastage. The simulation results showed that the two control methods presented in this paper have an excellent suppression effect on ultra-low frequency oscillation.

Keywords: hydro-PV complementary; oscillation suppression; damping torque analysis; ultra-low frequency oscillation; water hammer effect

随着清洁能源的迅速发展,分布式光伏大量接入电网,然而受光照和温度的影响,其出力的随机性和波动性对光伏消纳和系统稳定运行提出挑战。我国的水能资源十分丰富,水电装机容量世界第一,其中中小水电机组约占 23.5%。水力发电具有灵活启动、快速调节的特点^[1],在小水流域内安装分布式光伏发电,形成分布式光伏与小水电互补发电系统(简称水光互补系统),可利用水电的灵活调节特性平抑光伏的出力波动,对提升光伏消纳能力、增强系统总体可调度能力、实现多时间尺度多能互补具有重要意义^[2]。

然而,在高比例水电系统中,由于水电机组的“水锤效应”和调速器的参数设置不合理,水电机组将会向系统提供负阻尼,从而引发超低频振荡^[3]。超低频振荡是指振荡频率低于 0.1 Hz 的频率振荡现象,区别于传统的低频振荡,此现象是全网频率的同步振荡^[4]。2016年4月,在南方电网和云南电网异步联网的实验中,发生了长达半个小时的严重超低频振荡事故,在解除水轮机的一次调频功能后,振荡逐渐消失^[5]。此外,2011年哥伦比亚电网^[6]、2012年锦苏直流送端孤岛系统^[7]、2017年云广特高压直流孤岛系统^[8]等都发生了超低频振荡事故。对于水光互补系统,光伏随机波动进一步恶化了稳定问题,超低频振荡成为制约水电与光伏消纳和送出的重要因素,因此研究水光互补系统的超低频振荡抑制控制措施具有重要意义。

已有研究表明,超低频振荡与水电机组的一次调频过程强相关,因此超低频振荡的抑制措施大多采用优化水轮机调速器控制参数的方法。文献[9]使用 PSO 优化算法整定调速器参数从而提高阻尼转矩抑制超低频振荡;文献[10]基于阻尼转矩法,分析出比例参数和积分参数比值过小从而导致阻尼系数小是发生超低频振荡的内在原因,并提出最优 PID 参数的整定方法;文献[11]的分析结果表明,永态差值系数和水锤系数过小会造成负阻尼,并提出 GA-PSO

优化算法进行参数整定;文献[12]提出了一种考虑多方式鲁棒稳定约束条件下最大化系统跟踪性能的调速器参数优化方法;文献[13]使用状态子空间辨识算法和改进粒子群算法用于调速器参数优化设计。以上研究主要通过适当调整调速器控制参数抑制超低频振荡,然而,超低频振荡抑制与一次调频对调速器控制参数的要求存在矛盾,为了抑制超低频振荡将牺牲一次调频性能,会导致频率调节速度可能无法满足要求。因此,亟待研究兼顾超低频振荡抑制和一次调频性能的水电侧超低频振荡抑制控制方法。

此外,分布式光伏具有灵活的控制能力,可为振荡抑制提供更多的灵活控制资源。但目前对于利用光伏抑制振荡的研究主要聚焦在低频振荡方面,通过在光伏逆变器的控制环中引入附加阻尼控制以抑制低频振荡。文献[14]基于相关辨识法提出光伏广域阻尼控制器;文献[15-16]提出使用全部的有功功率调节能力用于阻尼控制或者留出一半的有功出力以便为阻尼控制提供充足的裕度;文献[17]提出了基于自抗扰控制的光伏电站有功附加阻尼控制;文献[18]使用综合功率调制设计光伏广域附加阻尼控制器。然而,如何设计光伏逆变器的阻尼控制器,以抑制超低频振荡现象,目前极少有文献研究。

为此,本文针对水光互补系统存在的超低频振荡问题,分别从水电机组和分布式光伏发电出发,提出了两种超低频振荡抑制控制策略。首先对水轮机调速系统进行阻尼转矩分析,揭示超低频振荡的基本机理和影响因素;其次,对于水电机组通过在调速侧采用串联校正环节,补偿调速器和水轮机产生的滞后相位,改善水电机组的阻尼特性,能够在不牺牲一次调频性能的前提下抑制超低频振荡;然后,对于光伏提出了有功附加控制方法,根据频率的偏差动态调整有功出力,为系统振荡提供正阻尼,并设计控制参数自适应调节方法以应对光伏出力的波动特性;最后,对四川某地区的实际水光互补系统构建时域仿真模型,

验证所提出控制方法的有效性.

1 阻尼转矩分析原理介绍

水电机组水轮机和调速器的模型见图 1. 图中的 ΔP_m 是原动机调速器机械功率的偏差值; $\Delta\omega$ 是转速的偏差值; ω_{ref} 是转速参考值.

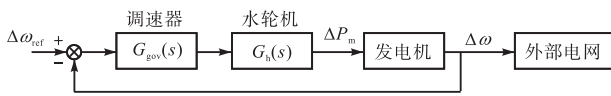


图 1 水电机组调速系统

Fig.1 Governor system of hydro generator

水轮机的传递函数 $G_h(s)$ 表达式为

$$G_h(s) = \frac{1 - T_W s}{1 + 0.5 T_W s} \quad (1)$$

式中 T_W 为水轮机的水锤系数, 取值在满载时一般为 0.5 ~ 4 s.

调速器的传递函数 $G_{gov}(s)$ 表达式为

$$G_{gov}(s) = G_{PID}(s)G_G(s) \quad (2)$$

式中: $G_{PID}(s)$ 是 PID 型调速器的传递函数; $G_G(s)$ 是伺服系统的传递环数, 它们的具体表达式为

$$G_{PID}(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{b_p K_I + s} \quad (3)$$

$$G_G(s) = \frac{1}{1 + T_G s} \quad (4)$$

式中: K_P 、 K_I 、 K_D 分别是比例、积分、微分系数; b_p 是调差系数; T_G 是伺服系统的时间常数.

定义 $G(s) = G_{gov}(s)G_h(s)$ 为调速系统传递函数. 下面使用阻尼转矩法, 对水电调速系统的阻尼进行分析^[19]. 发电机的运动方程为

$$\begin{cases} T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_m - \Delta P_e - D\Delta\omega \\ \Delta\omega = \frac{1}{\omega_0} s\Delta\delta \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_J 是惯性时间常数; P_m 是机械功率; P_e 是电磁功率; D 是阻尼系数; ω_0 是基准角频率; δ 是发电机相角.

当系统振荡角频率为 ω_s 时, 令 $s = j\omega_s$ 代入式 (5), 则转速偏差的表达式可以写为

$$\Delta\omega = \frac{j\omega_s \Delta\delta}{\omega_0} \quad (6)$$

则 ω_s 下的水轮机调速系统传递函数可以写为

$$-\Delta P_m(j\omega_s) = G(j\omega_s)\Delta\omega = \text{Re}[G(j\omega_s)]\Delta\omega + j\text{Im}[G(j\omega_s)]\Delta\omega \quad (7)$$

将式 (6) 代入式 (7), 得到

$$-\Delta P_m(j\omega_s) = \text{Re}[G(j\omega_s)]\Delta\omega - \frac{\omega_s}{\omega_0} \text{Im}[G(j\omega_s)]\Delta\delta = D_T \Delta\omega + S_T \Delta\delta \quad (8)$$

式中: D_T 是阻尼转矩; S_T 是同步转矩. 转矩之间的位置关系如图 2 所示.

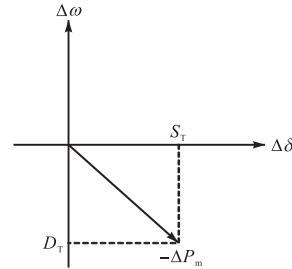


图 2 转矩相对位置

Fig.2 Relative position of mechanical torque

当阻尼转矩 $D_T < 0$ 时, $G_{gov}(s)$ 和 $G_h(s)$ 都是滞后环节, $-\Delta P_m$ 的相位滞后于 $\Delta\omega$, 水轮机调速系统整体提供负阻尼, 会导致超低频振荡的发生. 因此, 在抑制超低频振荡时, 需要设计控制器补偿系统滞后的相位, 提高系统的阻尼系数.

2 水电机组串联校正控制

2.1 控制结构设计

为了在满足一次调频性能的同时抑制超低频振荡, 本文提出了一种使用超前校正的串联校正环节, 补偿调速器和水轮机滞后的相位, 将其加入到调速系统中的结构框图见图 3.

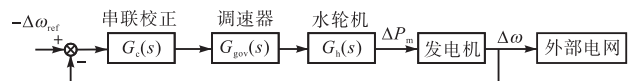


图 3 串联校正控制框图

Fig.3 System model with series calibration controller

串联校正环节 $G_c(s)$ 的表达式为

$$G_c(s) = K_c \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \frac{1 + sT_3}{1 + sT_4} \quad (9)$$

式中: T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 为时间常数; K_c 为增益, 各超前校正系数在整定时, 一般需要满足 $T_1 > T_2 > 0$, $T_3 > T_4 > 0$, $K_c > 0$.

加入串联校正环节后, 产生超前的相位, 阻尼转矩由负变正, 为系统提供正阻尼, 可有效抑制超低频振荡.

图 4 给出了有/无串联校正时阻尼转矩系数对比. 由图 4 可以看出, 对于无串联校正控制器的水电机

组,在超低频段的负阻尼非常大,系统容易发生超低频振荡;当加入串联校正控制器后,系统在超低频频段的阻尼转矩系数有明显改善,由此可说明:①水电机组产生的负阻尼是造成超低频振荡现象发生的重要原因;②在水电机组的调速侧引入串联校正控制器抑制超低频振荡具备可行性.

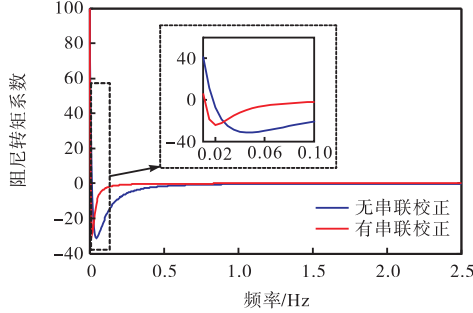


图4 阻尼转矩系数比较

Fig.4 Damping torque coefficient comparison

2.2 控制参数整定

为了优化整定水电机组串联校正环节的控制参数,定义反映调速侧开环模型在超低频段的阻尼水平指标函数为

$$J = \sum_{f_{min}}^{f_{max}} D_T(f) \quad (10)$$

式中 $D_T(f)$ 为调速系统传递函数 $G(s)$ 在关注频率范围内的阻尼转矩系数代数之和. 求解时频率上限可取为 0.1 Hz, 下限可取为 0.01 Hz. 由此可以得到描述串联校正参数优化问题的优化模型, 见式 (11).

$$\begin{aligned} \max J &= \sum_{f_{min}}^{f_{max}} D_T(f) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} K_{cmin} < K_c < K_{cmax} \\ T_{1min} < T_1 < T_{1max} \\ T_{2min} < T_2 < T_{2max} \\ T_{3min} < T_3 < T_{3max} \\ T_{4min} < T_4 < T_{4max} \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

式中 K_{cmin} 、 K_{cmax} 、 T_{imin} 、 T_{imax} ($i = 1, 2, 3, 4$) 为相应参数的上、下限. 利用粒子群优化算法^[20]对上述参数优化模型求解, 可得到单台水电机组的最优串联校正控制参数. 粒子群优化算法求解流程如图 5 所示.

粒子群优化算法是一种受动物种群行为得出的随机优化方法. 首先生成一个速度和位置随机的粒子种群, 每个粒子从自身的起始位置开始, 在有限的空间内进行搜索; 以阻尼水平指标函数 J 作为对粒子位置的评价函数, 然后通过每个粒子的移动和整个种群最优值的更新来实现对最优解的寻找.

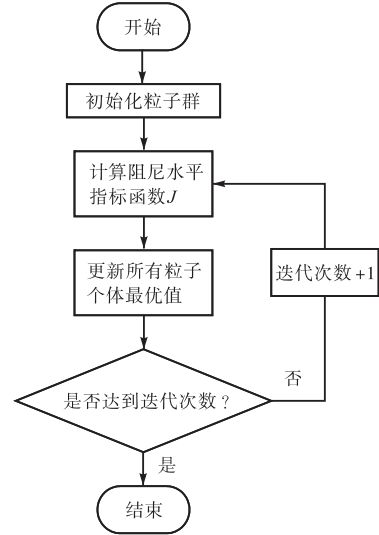


图5 粒子群优化算法求解流程

Fig.5 Particle swarm optimization procedure

3 光伏有功附加控制

本节设计了光伏的有功附加控制方法, 抑制超频振荡. 所设计控制方法的本质是根据系统振荡时产生的频率偏差, 动态调整有功出力, 为系统提供正阻尼, 参与频率稳定控制. 本文提出的附加控制器结构见图 6, 其中光伏功率控制器结构见图 7.

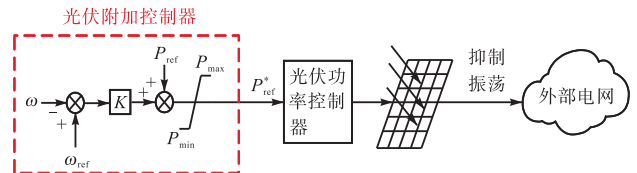


图6 光伏附加控制器结构

Fig.6 Structural representation of the additional photovoltaic controller

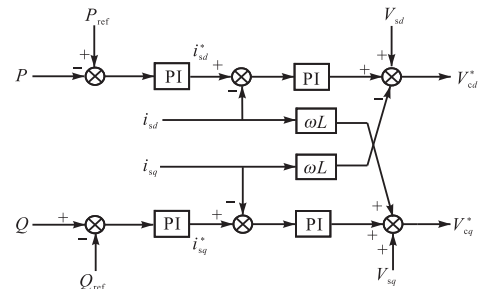


图7 光伏功率控制器结构

Fig.7 Structural representation of the photovoltaic controller

光伏附加控制器的表达式为

$$P_{ref}^* = P_{ref} + K(\omega_{ref} - \omega) \quad (12)$$

系统的实际角频率 ω 和参考角频率 ω_{ref} 的差作

为附加控制器的输入,当系统频率升高时,功率参考值 P_{ref}^* 会增加;当系统频率降低时,功率参考值 P_{ref}^* 会减小,从而起到抑制超低频振荡的效果.

经过附加控制器计算得出有功功率参考值 P_{ref}^* 和无功功率参考值 Q_{ref} 作为光伏控制器的输入,与功率实际值 P 和 Q 做差后经过功率 PI 控制器得到电流参考值的 d, q 轴分量 i_{sd}^* 和 i_{sq}^* , 及实际值 i_{sd} 和 i_{sq} 做差后经过电流 PI 控制器,最终可得到电压调制信号的 d, q 轴分量 V_{cd}^* 和 V_{cq}^* . 经过 PWM 输出脉冲信号后,控制逆变器输出恒定的功率. V_{sd} 和 V_{sq} 为逆变器输出电压的 d, q 轴分量, L 为逆变器的输出滤波电感.

下面阐述所设计的光伏附加控制器的控制原理. 根据系统功率平衡可得

$$\Delta P_e + \Delta P_{PV} = \Delta P_L \quad (13)$$

式中: ΔP_e 是电磁功率变化量; ΔP_{PV} 是光伏出力变化量; ΔP_L 是负荷的变化量,忽略负荷的频率调节效应,即认为 $\Delta P_L = 0$, 可得

$$\Delta P_e = -\Delta P_{PV} \quad (14)$$

将式(14)与式(8)代入式(5)中,得到

$$T_J s^2 \Delta \delta + (D_T + K + D) \Delta \omega + \omega_0 S_T \Delta \delta = 0 \quad (15)$$

根据式(15)可得到系统的阻尼比为

$$\xi = \frac{D_T + K + D}{2\sqrt{T_J \omega_0 S_T}} \quad (16)$$

根据式(16)可以看出,附加控制器的控制系数 K 影响阻尼比 ξ 的变化. 通过增大控制器系数 K , 可以增大系统的阻尼,从而抑制超低频振荡.

然而,水光互补系统中一般存在多个光伏电站,它们分布在不同的地区,受到当地天气的影响,出力并不能总是维持在最大功率,因此控制器的调节系数 K 需要跟随变化. 为了实现多光伏机组对超低频振荡的协调控制,各机组承担的控制任务应该根据实际出力进行合理调整. 当天气条件好,光伏出力多时,要适当增大控制系数;反之,则控制系数适当减小. 因此,第 i 台光伏的自适应调节系数 K_i^* 为

$$K_i^* = K_i \frac{P_{maxi}}{S} \quad (17)$$

式中: S 是光伏容量; K_i 是光伏按容量设置的原始调节系数; P_{maxi} 是当前环境条件下光伏的最大出力.

4 算例设计

本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台建立了四川省某地区水光互补发电系统仿真模型,对所提控制方法进行对比验证,电网结构如图 8 所示. 该地位于川

西高原,本地消纳清洁能源的能力较差,大部分电能通过 220 kV 双回线路外送. 当灾害、检修或故障发生时,该地电网将改为离网运行,高比例的水电导致该地极易发生超低频振荡现象.

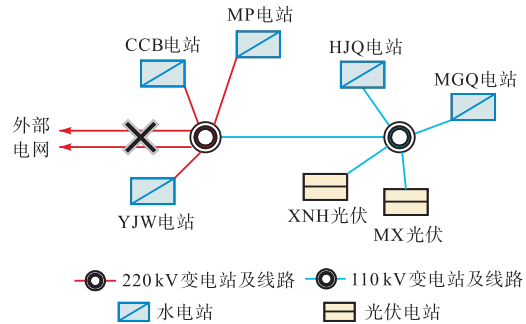


图 8 四川某地区水光互补发电系统结构

Fig.8 Structure of the hydro-PV complementary power generation system in Sichuan

系统中包括 CCB、MP、YJW、HJQ、MGQ 5 个水电站和 XNH 和 MX 两个光伏电站. 水电总容量为 380 MW, 光伏总容量为 20 MW. 本地负荷为 60 MW+ 10 Mvar. 各个水电、光伏电站的装机情况见表 1.

表 1 水光互补系统水电、光伏电站装机情况

Tab.1 Installed hydropower and photovoltaic power stations in the hydro-PV complementary system

电站名称	机端电压/kV	电站容量/MW
CCB 电站	10.0	65
MP 电站	10.0	55
YJW 电站	10.0	75
HJQ 电站	10.0	140
MGQ 电站	10.0	45
XNH 光伏	0.4	10
MX 光伏	0.4	10

系统中负荷模型采用恒阻抗模型, XNH 和 MX 两个光伏电站的出力分别为 10 MW 和 5 MW, 水电机组采用 PID 型调速器, 相关参数设计参考实际数据, 具体参数见表 2.

表 2 水电机组 PID 调速器参数

Tab.2 Parameters of PID governor of the hydroelectric unit

电站名称	K_p	K_i	K_D	T_G	T_w
CCB 电站	2.0	1.0	0	0.2	1.5
MP 电站	2.5	1.2	0	0.2	1.0
YJW 电站	2.0	1.0	0	0.2	1.5
HJQ 电站	1.5	0.8	0	0.2	2.0
MGQ 电站	2.5	1.2	0	0.2	1.0

4.1 稳态运行

水光互补系统在稳态运行时, 各水电机组和光伏电站的有功出力见图 9, 可见系统在稳态时能够稳定

运行。

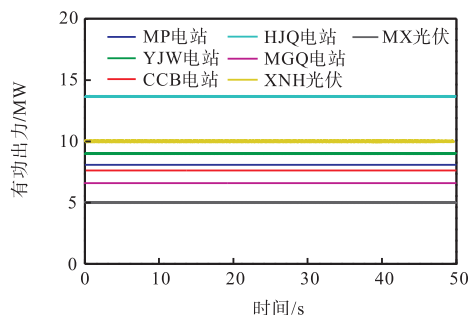


图 9 各水电、光伏有功出力

Fig.9 Output of hydropower and photovoltaic powers

由图 9 得出，稳态运行时，各个电站出力如表 3 所示。

表 3 水光互补系统水电、光伏电站出力情况

Tab.3 Output of hydropower and photovoltaic power stations in the hydro-PV complementary system

电站名称	有功功率/MW
CCB 电站	7.62
MP 电站	8.08
YJW 电站	9.00
HJQ 电站	13.67
MGQ 电站	6.58
XNH 光伏	10.00
MX 光伏	5.00

4.2 串联校正控制方法验证

将串联校正控制器加入互补系统的水电机组中，由于各控制器之间具有解耦特性^[9]，因此使用 PSO 算法对水电机组逐一进行参数优化整定，各参数取值的上、下限如表 4 所示；各机组整定前后的阻尼水平指标函数 J 变化如表 5 所示，可见整定后各机组的阻尼水平有明显提升；整定后的各机组串联校正控制器参数如表 6 所示。

表 4 控制参数整定范围

Tab.4 Control parameter setting range

整定范围	K_c	T_1	T_2	T_3	T_4
上限	10	10	10	10	10
下限	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表 5 整定前后阻尼水平指标函数对比

Tab.5 Comparison of damping level index function before and after setting

电站名称	J	
	整定前	整定后
CCB 电站	0.054 5	0.312 4
MP 电站	0.182 5	0.356 5
YJW 电站	0.054 5	0.312 4
HJQ 电站	-0.038 0	0.180 3
MGQ 电站	0.182 5	0.356 5

表 6 水电机组串联校正控制器参数

Tab.6 Parameters of the series calibration controller for the hydroelectric units

电站名称	K_c	T_1	T_2	T_3	T_4
CCB 电站	1.02	3.16	1.82	3.16	1.82
MP 电站	0.89	2.92	1.96	2.92	1.96
YJW 电站	1.02	3.16	1.82	3.16	1.82
HJQ 电站	1.13	3.02	1.61	3.02	1.61
MGQ 电站	0.89	2.92	1.96	2.92	1.96

传统控制方法通过优化水电机组 PID 调速器的控制参数，也可以达到抑制超低频振荡的效果，但是会降低一次调频的性能。使用传统控制方法优化后的调速器 PID 参数如表 7 所示。

表 7 传统方法优化的水轮机调速器参数

Tab.7 Parameters of hydro turbine governor optimized by the traditional method

电站名称	K_p	K_I	K_D	T_G	T_w
CCB 电站	8	0.25	0	0.2	1.5
MP 电站	10	0.60	0	0.2	1.0
YJW 电站	4	0.50	0	0.2	1.5
HJQ 电站	3	0.40	0	0.2	2.0
MGQ 电站	10	0.30	0	0.2	1.0

系统仿真时间设置为 50 s，在 0 s 时投入 30 MW 的负荷作为扰动，不同控制方法下系统频率的振荡曲线见图 10。当偏差值小于 0.1% 认为系统进入稳态，各系统的超调量和调整时间对比如表 8 所示。

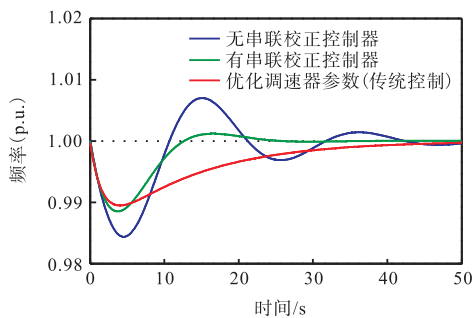


图 10 增加串联控制器前后系统的频率对比

Fig.10 System frequency comparison before and after the series controller

表 8 各方法超调量和调整时间对比

Tab.8 Comparison of overshoot and adjustment time of each method

抑制方法	超调量/%	调整时间/s
无串联校正控制器	0.70	38.948
有串联校正控制器	0.12	18.716
优化调速器参数(传统控制)	0	35.186

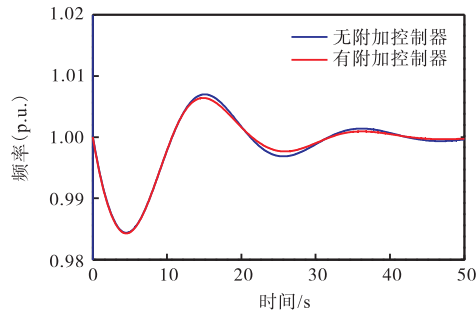
由图 10 和表 8 可以看出，未使用串联校正控制器时，系统超低频振荡剧烈，衰减缓慢。在使用传统控制方法即仅优化水电机组调速器 PID 参数时，是在

抑制超低频振荡与理想的一次调频性能之间取折中,折中的结果是导致一次调频性能也有一定牺牲,频率调节速度偏慢. 而使用串联校正控制后,振荡迅速平息,且频率快速趋于平稳,说明本文所提串联校正控制方法能够兼顾超低频振荡抑制和一次调频性能.

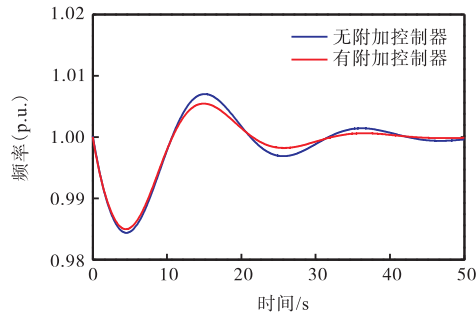
4.3 光伏有功附加控制验证

XNH 光伏和 MX 光伏实际出力分别为 10 MW 和 5 MW, 控制系数 K 均设置为 150, 由式 (17) 可知, 此时自适应调节系数 K_i^* 分别为 150 和 75.

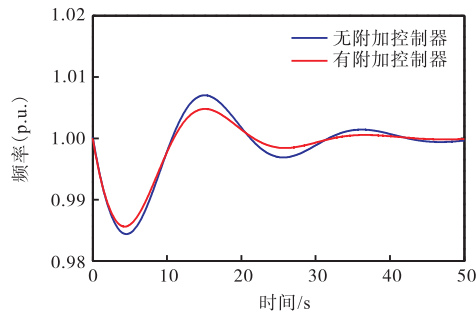
由于光伏一般工作在最大功率点, 此时仅能向下单向调节. 为验证光伏有功附加控制的有效性, 分别对光伏机组全出力、预留 10% 出力和预留 30% 出力进行对比验证, 系统频率对比见图 11, 光伏出力对比见图 12. 当偏差值小于 0.1% 认为系统进入稳态, 系统的超调量和调节时间对比见表 9.



(a) 无预留



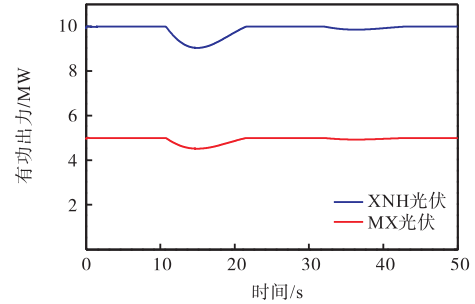
(b) 预留 10%



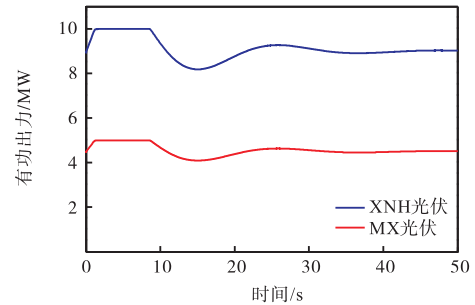
(c) 预留 30%

图 11 增加附加控制器前后系统频率对比

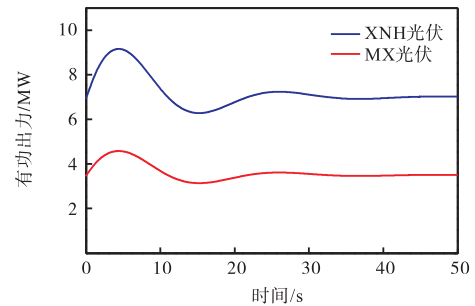
Fig.11 System frequency comparison before and after the additional controller



(a) 无预留



(b) 预留 10%



(c) 预留 30%

图 12 光伏机组出力对比

Fig.12 Photovoltaic unit output comparison

表 9 各方法超调量和调整时间对比

Tab.9 Comparison of overshoot and adjustment time of each method

抑制方法	超调量/%	调整时间/s
无附加控制器	0.70	38.948
有控制器,无预留	0.64	29.976
有控制器,预留 10%	0.54	29.351
有控制器,预留 30%	0.48	29.118

由于光伏存在最大功率点, 所以图 12(a) 和 (b) 中有功出力均不能超过最大输出 10 MW 和 5 MW. 由图 11、图 12 和表 9 得出, 光伏附加控制在无预留的单向调节情况下依然能起到抑制超低频振荡的效果. 而相比无预留的情况, 有 10% 预留出力时抑制效果更好, 而预留出力为 30% 时抑制效果又有一定提升, 体现为超调量的进一步降低和调整时间的进一步减小, 但是光伏机组的有功出力没有得到充分利用. 为了防止光伏容量的浪费, 提升利用率, 预留容

量可以选择 10%。

4.4 水电 + 光伏综合控制验证

水电机组串联校正控制器和光伏机组有功附加控制器分别控制水电机组和光伏机组，两种控制器共同服务于抑制超低频振荡这个相同的控制目标，因此对两种控制器的综合控制效果进行验证，其中光伏采取 10% 的容量预留，系统频率对比见图 13，系统的超调量和调节时间对比见表 10。

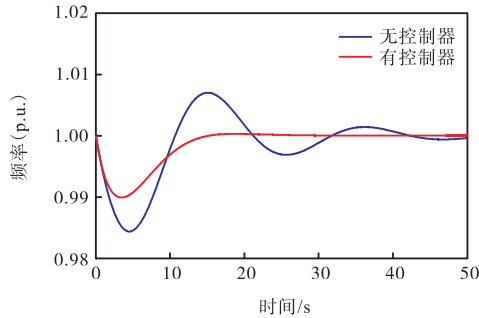


图 13 增加控制器前后系统频率对比

Fig.13 System frequency comparison before and after the controller

表 10 增加控制器前后超调量和调节时间对比

Tab.10 Comparison of overshoot and adjustment time before and after the controller

抑制方法	超调量/%	调整时间/s
无控制器	0.700 0	38.948
有控制器	0.000 3	12.645

由图 13、表 10 的结果以及其同图 10、图 11 (b)、表 8、表 9 的结果进行对比可知，水电 + 光伏超低频振荡综合控制的振荡抑制效果良好，频率快速稳定在额定值，且比单独的水电串联校正控制或光伏有功附加控制效果更好。因此，说明了本文提出的两种控制器方法的协同抑制效果更好。

4.5 考虑调节死区时的振荡抑制控制效果验证

同步发电机调速系统中，一次调频的调节死区较多设置为 $\pm 0.033 \text{ Hz}^{[21]}$ 。考虑死区后，仅采用水电机组串联校正控制器，系统加入控制器前后的频率对比见图 14。由结果可以看出，由于死区效应，频率振荡波形稳定在 $(1 \pm 0.000 66) \text{ p.u.}$ 内 ($0.000 66 = 0.033/50$)，与未加入死区的图 10 对比，串联校正控制器的抑制振荡效果并未受到影响。

在光伏机组中，死区环节参数设置和常规电源相同^[22]，因此也设置为 $\pm 0.033 \text{ Hz}$ 。考虑死区后，仅采用光伏机组有功附加控制器，并且机组预留 10%，系统加入控制器前后的频率对比见图 15。由结果可以

看出，由于死区效应，频率振荡波形稳定在 $(1 \pm 0.000 66) \text{ p.u.}$ 内，与未加入死区的图 11 (b) 对比，光伏有功附加控制器的抑制振荡效果并未受到影响。

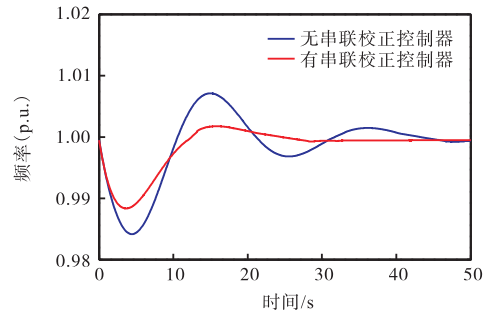


图 14 考虑死区时增加串联控制器前后系统的频率对比
Fig.14 System frequency comparison before and after the series controller considering the dead zone

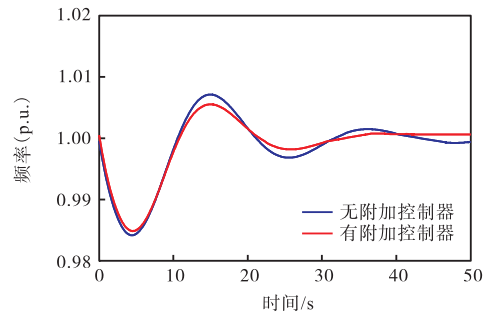


图 15 考虑死区时增加有功附加控制器前后系统频率对比
Fig.15 System frequency comparison before and after the additional controller considering the dead zone

同时，将两种控制器投入使用，加入控制器前后互补系统频率波形进行对比，见图 16。

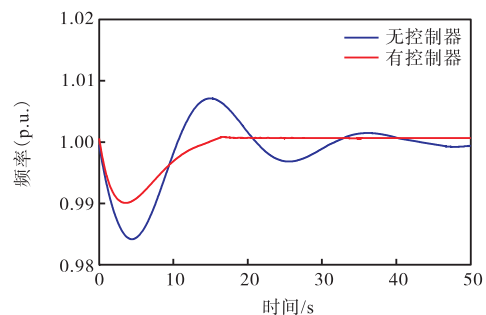


图 16 考虑死区时增加控制器前后系统频率对比
Fig.16 System frequency comparison before and after the two controllers considering the dead zone

与文中未考虑死区情况的图 13 做对比，可以发现，加入死区后，控制器的抑制振荡效果依然良好，可以使频率稳定在死区范围 $(1 \pm 0.000 66) \text{ p.u.}$ 内。

综上所述，本文提出的控制器振荡抑制效果并未受到死区的影响，考虑死区后，依然可以起到良好的

超低频振荡抑制效果。

5 结 论

本文针对水光互补系统存在的超低频振荡现象,分别提出了水电机组和光伏逆变器的超低频振荡抑制控制方法,结论如下。

(1) 基于阻尼转矩分析法,计算了水电机组调速系统的阻尼转矩系数,得出水轮机和调速器的负阻尼效应是产生超低频振荡的主要原因。

(2) 针对水电机组提出了串联校正控制方法,可以改善水电机组的阻尼特性,提升超低频段的阻尼;针对光伏提出了有功附加控制器,可以通过调节光伏出力实现超低频振荡的抑制。

(3) 在基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台的四川某地区的实际水光互补系统算例中,对提出的两种控制方法进行了测试。仿真结果表明,在水电机组中加入串联校正控制能够改善水电机组的负阻尼效应,有效抑制超低频振荡;在光伏中加入有功附加控制同样可以起到抑制振荡的作用,且光伏用于调节的预留出力越大,振荡抑制效果越好。

参考文献:

- [1] 安源,方伟,黄强,等.水-光互补协调运行的理论与方法初探[J].太阳能学报,2016,37(8):1985-1992.
An Yuan, Fang Wei, Huang Qiang, et al. Preliminary research of theory and method of hydro/solar complementary operation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2016, 37(8): 1985-1992 (in Chinese).
- [2] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.
Han Xiaoyan, Ding Lijie, Chen Gang, et al. Key technologies and research prospects for cascaded hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid power generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2711-2722 (in Chinese).
- [3] 郭相阳,徐政,董桓锋,等.水电机组引起的超低频振荡机理分析[J].广东电力,2018,31(4):21-26.
Guo Xiangyang, Xu Zheng, Dong Huanfeng, et al. Analysis on ultra-low frequency oscillation mechanism caused by hydroelectric units[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 21-26 (in Chinese).
- [4] 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.
Lu Xiaomin, Chen Lei, Chen Yiping, et al. Ultra-low-frequency oscillation of power system primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 64-70 (in Chinese).
- [5] 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.
Fu Chao, Liu Yongjun, Tu Liang, et al. Experiment and analysis on asynchronously interconnected system of Yunnan power grid and main grid of China Southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(7): 1-5 (in Chinese).
- [6] Pico H V, Mccalley J D, Angel A, et al. Analysis of very low frequency oscillations in hydro-dominant power systems using multi-unit modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1906-1915.
- [7] 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.
He Jingbo, Zhang Jianyun, Li Mingjie, et al. Frequency domain analysis and control for governor stability problem in islanded HVDC sending systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 137-143 (in Chinese).
- [8] 李伟,肖湘宁,郭琦.云广特高压直流送端孤岛运行超低频振荡与措施[J].电力系统自动化,2018,42(16):161-166.
Li Wei, Xiao Xiangning, Guo Qi. Ultra-low-frequency oscillation and countermeasures in Yunnan-Guangdong UHVDC sending-end system in islanded operating mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 161-166 (in Chinese).
- [9] Chen L, Lu X, Min Y, et al. Optimization of governor parameters to prevent frequency oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4466-4474.
- [10] 苏亚鹏,刘天琪,李保宏,等.超低频振荡机理分析及水轮机调速系统参数优化[J].电网技术,2020,44(3):1008-1016.
Su Yapeng, Liu Tianqi, Li Baohong, et al. Mechanism analysis of ultra-low frequency oscillation and parameter optimization of hydro turbine governor[J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 1008-1016 (in Chinese).

- [11] 肖 灿, 王德林, 李振鹏, 等. 抑制电力系统超低频振荡的水轮机调速器参数优化控制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2135-2142.
Xiao Can, Wang Delin, Li Zhenpeng, et al. Research on parameter optimization control of turbine governor for suppressing ultra-low frequency oscillation in power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2135-2142 (in Chinese).
- [12] 黄 伟, 段荣华, 江崇熙, 等. 多机系统超低频振荡稳定分析与调速器参数优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 185-191.
Huang Wei, Duan Ronghua, Jiang Chongxi, et al. Stability analysis of ultra-low frequency oscillation and governor parameter optimization for multi-machine system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 185-191 (in Chinese).
- [13] 王渝红, 陈 阳, 曾 琦, 等. 一种抑制超低频振荡的水电机组调速器参数协调优化方法研究[J]. 四川电力技术, 2019, 42(2): 10-14, 29.
Wang Yuhong, Chen Yang, Zeng Qi, et al. Research on governor parameter coordinated optimization to suppress ULFO for hydraulic turbine[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2019, 42(2): 10-14, 29 (in Chinese).
- [14] 葛 景, 都洪基, 马 进, 等. 基于相关辨识法的大型光伏电站广域阻尼控制器设计[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 76-81.
Ge Jing, Du Hongji, Ma Jin, et al. Design of wide-area damping controller for large-scale PV power plants based on correlation identification method[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(3): 76-81 (in Chinese).
- [15] Liu Y, Zhu L, Zhan L, et al. Active power control of solar PV generation for large interconnection frequency regulation and oscillation damping[J]. International Journal of Energy Research, 2016, 40(3): 353-361.
- [16] Li G, Sun Y, Wang Q, et al. Design of a photo-voltaic system to enhance network dynamic stability[J]. Smart Grid and Renewable Energy, 2010, 1(1): 1-6.
- [17] 马燕峰, 蒋云涛, 陈 磊, 等. 光伏电站自抗扰附加阻尼控制抑制低频振荡策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1741-1747.
Ma Yanfeng, Jiang Yuntao, Chen Lei, et al. An ADRC additional damping control strategy research on low frequency oscillation suppression of photovoltaic plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1741-1747 (in Chinese).
- [18] 白 凡, 王宝华. 光伏并网对低频振荡的影响与抑制[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 255-261.
Bai Fan, Wang Baohua. Influence and suppression of grid-connected solar power plants on low frequency oscillation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(3): 255-261 (in Chinese).
- [19] 刘少博, 王德林, 马宁宁, 等. 水电机组引起的超低频振荡特性及抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5354-5362, 5582.
Liu Shaobo, Wang Delin, Ma Ningning, et al. Study on characteristics and suppressing countermeasures of ultra-low frequency oscillation caused by hydropower units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5354-5362, 5582 (in Chinese).
- [20] Hassan M A, Abido M A. Optimal design of microgrids in autonomous and grid-connected modes using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 755-769.
- [21] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
Ma Zhihui, Li Xinran, Tan Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2102-2115 (in Chinese).
- [22] 赵大伟, 马 进, 钱敏慧, 等. 光伏电站参与大电网一次调频的控制增益研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 425-435.
Zhao Dawei, Ma Jin, Qian Minhui, et al. Research on control gain for photovoltaic power plants participating in primary frequency regulation of large power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 425-435 (in Chinese).

(责任编辑:樊素英)