

引用格式:赵熙临,赵宇翔,李品.基于直流附加频率控制的高水电占比电力系统超低频振荡抑制方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):29-38.

Citation: ZHAO Xilin, ZHAO Yuxiang, LI Pin. A method for suppressing ultra-low-frequency oscillations in high hydroelectric power systems based on DC additional frequency control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 29-38.

# 基于直流附加频率控制的高水电占比电力系统超低频振荡抑制方法

赵熙临<sup>1</sup>, 赵宇翔<sup>1</sup>, 李品<sup>2</sup>

(1.湖北工业大学电气与电子工程学院,湖北武汉 430068;2.凌云科技集团有限责任公司,湖北当阳 444100)

**摘要:**随着柔性直流(direct current, DC)异步互联工程相继推进,高水电占比高带来的超低频振荡问题威胁着电力系统频率的稳定。针对超低频振荡现象的发生,提出基于柔性直流输电即电压源换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)系统的附加频率控制策略。首先,构建含水电、火电机组的频率响应模型,通过阻尼转矩分析揭示超低频振荡产生机理,明确各类调速器参数以及不同水电占比对系统超低频振荡发生的影响;随后,根据直流电容电压与交流系统频率耦合特性,对换流站参与抑制超低频振荡机理进行研究,提出换流站虚拟惯性与 $V_{DC}$ - $f$ 下垂的控制方式,并通过约束条件对虚拟惯性与下垂参数进行设计;最后,基于MATLAB/SIMULINK平台搭建含水电、火电机组的负荷频率控制模型,通过对比水轮机参数优化方法验证所提方法的有效性。

**关键词:**超低频振荡;柔性直流输电;负阻尼特性;虚拟惯性;一次调频;异步互联

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.003 中图分类号: TM761 文章编号: 1673-9140(2025)01-0029-10

## A method for suppressing ultra-low-frequency oscillations in high hydroelectric power systems based on DC additional frequency control

ZHAO Xilin<sup>1</sup>, ZHAO Yuxiang<sup>1</sup>, LI Pin<sup>2</sup>

(1.School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2.Lingyun Science & Technology Group Co., Ltd., Dangyang 444100, China)

**Abstract:** With the continuous advancement of flexible direct current (DC) asynchronous interconnection projects, the ultra-low-frequency oscillation problem caused by the high proportion of hydropower poses a threat to the frequency stability of the power system. To suppress the occurrence of these oscillations, an additional frequency control strategy based on a flexible DC transmission is proposed, which is also referred to as a voltage source converter-based high-voltage DC transmission (VSC-HVDC) system. Firstly, a frequency response model that includes both hydro and thermal power units is constructed. The formation mechanism of ultra-low-frequency oscillation is identified through damping torque analysis, and the influence of various governor parameters and different hydropower ratios on the occurrence of ultra-low-frequency oscillations in the system is explored. Secondly, based on the coupling characteristics of DC capacitor voltage and alternating current system frequency, the mechanism of the converter station participating in suppressing ultra-low-frequency oscillation is studied. A control method for virtual inertia and  $V_{DC}$ - $f$  droop of the converter station is proposed, and the virtual inertia and droop parameters are designed under constraint conditions. Finally, based on the MATLAB/SIMULINK platform, a load frequency control model that includes both hydro and thermal power units is constructed, and the effectiveness of the proposed method is verified by comparing the optimization methods of water turbine parameters.

**Key words:** ultra-low-frequency oscillation; flexible direct current transmission; negative damping characteristic; virtual inertia; primary frequency modulation; asynchronous interconnection

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-11-01

基金项目: 湖北省自然科学基金创新发展联合基金(2023AFD186)

通信作者: 李品(1999—),男,硕士,主要从事电力系统优化与控制研究; E-mail: 1596539726@qq.com

在贯彻双碳目标构建新型电力系统过程中,传统火电机组占比持续下降。由于光伏、风电等新能源设备或不具备惯性、或惯性与系统解耦,使现代电力系统呈现低惯性特点<sup>[1-4]</sup>。作为能提供转动惯量的水电机组,在电力系统安全稳定运行中扮演着更为重要的角色<sup>[5]</sup>。但高比例水电系统在一次调频过程中容易出现超低频振荡的现象,是高水电占比场景下需要解决的重要问题,若不能有效解决此问题,将严重影响水电资源的大规模开发利用<sup>[6-10]</sup>。

水电机组产生超低频振荡的主要原因是其调速器在调频过程中产生负阻尼转矩,导致功率进行反向调节<sup>[11]</sup>。有研究通过阻尼转矩法对单机单负荷系统进行分析,推理负阻尼产生机理<sup>[12]</sup>,在此基础上,通过分析阻尼转矩对系统稳定的影响,可以获取水轮机调速器提供正、负阻尼的区间以及系统阻尼转矩、同步转矩特性和相关因素间的关系<sup>[13-14]</sup>。明确解决超低频振荡的问题需要从减小负阻尼和增加正阻尼两方面考虑<sup>[15]</sup>。

在减小负阻尼方面,一些学者从调速器参数设置上进行研究,通过分析PID参数、水锤效应系数和调差系数对超低频振荡的影响,利用粒子群等优化算法对参数进行调节,实现对超低频振荡的抑制<sup>[16-20]</sup>。但调速器参数的调整会限制水电机组的一次调频能力,权重的不确定和量纲的不统一会使参数的最优性与鲁棒性难以保证;同时水电占比受季节影响,加大了参数调节难度,并且在实际调节过程中,参数优化方法也无法完全抑制超低频振荡现象<sup>[21]</sup>。在增大正阻尼方面,有研究通过加装电力系统稳定器来进行附加阻尼控制,但水轮机存在较大惯性,各参数的实时变化使设计和实现存在较大困难,并且加装设备会增加额外成本<sup>[22-23]</sup>。另外,也有研究利用储能或风电进行超低频振荡的抑制,但新能源的参与局限性较大,例如风机在功率提取过程中容易造成频率二次跌落<sup>[24-27]</sup>。因此,亟须新的方法辅助进行超低频振荡的抑制。

考虑超低频振荡一般发生于水电机组异步联网过程中,通过附加频率的下垂控制特性改变直流(direct current, DC)传输功率,在保证直流电压安全的前提下,不仅可以改善电网暂态稳定性,也可以改善电网的动态稳定性<sup>[28-29]</sup>。如何利用换流站有功控制特性进行超低频振荡的抑制,还需要深入研究。

本文基于上述思想提出一种换流站控制方法以抑制超低频振荡现象,通过换流站虚拟惯性与下

垂的控制方式参与频率振荡调节,为电网提供正阻尼,从而对超低频振荡进行有效抑制。

## 1 超低频振荡阻尼特性分析

以抑制超低频振荡为目标,当电力系统包括水电和火电机组时,其响应频率变化的控制系统如图1所示,其中,水电模型包含调速器 $G_g(s)$ 和原动机 $G_i(s)$ ,火电简化模型为 $G_h(s)$ 。

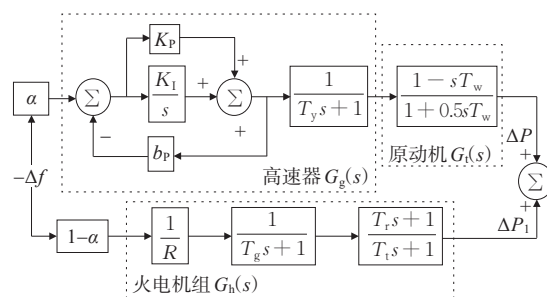


图1 含水轮机组与火电机组控制系统模型

Figure 1 Water turbine and thermal power unit control system model

当出现频率偏差时,水轮机组响应表达式<sup>[16]</sup>为

$$\Delta P = -\alpha \Delta f G_m(s) \quad (1)$$

$$G_m(s) = G_g(s) G_i(s) \quad (2)$$

$$G_g(s) = \frac{K_p s + K_i}{(1 + K_p b_p) s + K_i b_p} \cdot \frac{1}{1 + T_y s} \quad (3)$$

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

式(1)~(4)中, $\Delta P$ 为机械功率增量; $\Delta f$ 为机组频率偏差; $G_m(s)$ 为水轮机系统开环传递函数; $K_p$ 、 $K_i$ 为调速系统的PI控制器参数; $T_y$ 为液压执行机构惯性时间常数; $b_p$ 为调差系数; $T_w$ 为水锤效应时间常数; $\alpha$ 为火电占比; $s$ 为拉普拉斯算子。

构建发电机转子增量运动方程,即

$$\begin{cases} \Delta \delta = \frac{\omega_0}{s} \left[ \frac{1}{2Hs + D} (\Delta T_m - \Delta T_e) \right] \\ \Delta \omega = \frac{s \Delta \delta}{\omega_0} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Delta \delta$ 为功率角偏差; $\omega_0$ 为机组额定同步转速; $H$ 为发电机转动惯量系数; $D$ 为负荷阻尼系数; $\Delta T_m$ 、 $\Delta T_e$ 分别为机械转矩、电磁转矩增量<sup>[16]</sup>。

将 $s = j\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$ 为振荡频率)代入, $\Delta T_m$ 可分解为

$$\begin{cases} \Delta T_m = -(K_m \Delta \omega + K_d \Delta \delta) \\ K_m = \text{Re}(G_m(j\omega)) \\ K_d = \text{Im}(G_m(j\omega)) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $K_m$  为水电阻尼转矩系数, 当其为正时, 表现为正阻尼, 有利于抑制系统振荡, 反之则会加剧系统振荡;  $K_d$  为水电同步转矩系数。

假设在增量运动方程式(5)中忽略励磁效应, 即  $\Delta T_e = 0$ , 然后将式(6)代入式(5), 可得系统特征方程:

$$\left[ s^2 + \frac{(D + \alpha K_m)s}{2H} + \frac{K_d \omega_0}{2H} \right] \Delta \delta = 0 \quad (7)$$

对应该二阶方程得到系统阻尼比:

$$\xi = \frac{D + K_m}{2\sqrt{2HK_d\omega_0}} \quad (8)$$

根据文献[17]可知,  $K_m$  和  $K_d$  由水轮机调速系统传递函数在振荡角频率时的幅值和相位决定。当  $K_d$  小于零时, 系统会由于同步转矩不足而发生非周期失稳, 为了保证系统功角稳定,  $K_d$  需大于零<sup>[18]</sup>。本文参考文献[19]中的取值, 设置  $K_d = 0.823$ 。  $K_m$  是影响系统是否会发生周期失稳的关键参数, 因此, 联立水轮机组响应表达式(1)~(4)、(6), 可求解  $K_m$  表达式如下:

$$K_m = \frac{A_1 \omega^4 + A_2 \omega^2 + A_3}{(B_1 - B_2 \omega^2)^2 + (B_3 \omega - B_4 \omega^3)^2} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} A_1 = [(-6K_p^2 T_w b_p) + 2K_I T_w^2 - 6K_p T_w] T_y - \\ \quad 2K_p^2 T_w^2 b_p - 2K_p T_w^2 \\ A_2 = [(-6K_I^2 T_w b_p) - 4K_I] T_y + (4K_p^2 - \\ \quad 2K_I^2 T_w^2) b_p - 6K_I T_w + 4K_p \\ A_3 = 4K_I^2 b_p \\ B_1 = 2K_I b_p \\ B_2 = K_I T_w b_p T_y + 2K_p b_p T_y + 2T_y + K_p T_w b_p + T_w \\ B_3 = 2K_I b_p T_y + K_I T_w b_p + 2K_p b_p + 2 \\ B_4 = K_p T_w b_p T_y + T_w T_y \end{cases}$$

由式(9)可知, 水轮机组的阻尼转矩系数主要受水锤效应时间常数和调速器参数的影响。若设置调速系统参数  $K_p = 10$ 、 $K_I = 1$ 、 $T_y = 2$  s、 $b_p = 0.05$ , 改变  $T_w$ , 则可以得到随  $T_w$  变化的水轮机组转矩阻尼系数的变化, 如图2所示, 可见, 当其他参数固定时, 水轮机组在低频段呈现负阻尼特性, 并且负阻尼特性随着  $T_w$  的增大而增强, 该特性是引发系统超低频振荡的主要原因。当  $T_w = 4$ 、 $T_y = 2$  s、 $b_p = 0.05$  时, 改变调速器参数, 获取的水轮机组转矩阻尼系数的变化如图3所示, 可以看出, 控制器的参数变化对系统阻尼特性具有较大影响, 具体表现为随着控制器参数的比值增大, 其负阻尼特性就越显著, 该结论也与文献[16]中所述相符。

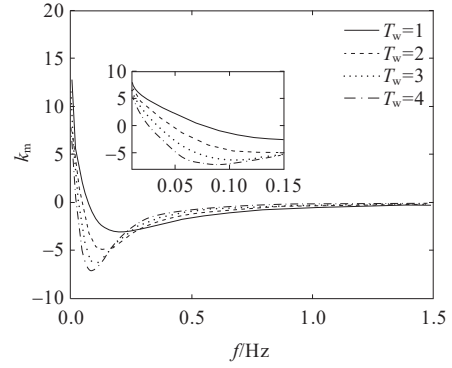


图2 不同  $T_w$  下的发电机阻尼特性

Figure 2 Damping characteristics of generator under different  $T_w$

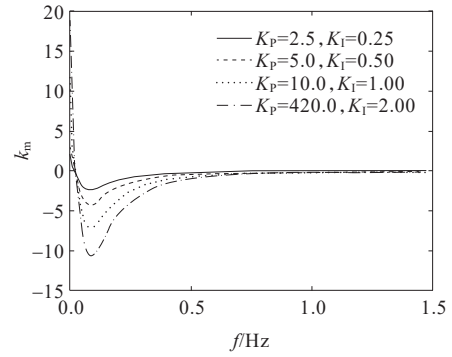


图3 不同调速器参数下的发电机阻尼特性

Figure 3 Damping characteristics of generator under different governor parameters

另一方面, 超低频振荡的产生还与水电占比有关。由图1可得, 火电机组  $G_h(s)$  响应模型表达式<sup>[19]</sup>为

$$\Delta P_1 = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{T_g + 1} \cdot \frac{T_r + 1}{T_t + 1} \Delta f \quad (10)$$

式中,  $\Delta P_1$  为火电机械功率增量;  $R$  为火电调差系数;  $T_g$  为气容时间常数;  $T_r$  为再热系数;  $T_t$  为再热时间常数。

将式(10)与式(5)、(6)联立, 可得火电调速系统中转矩系数<sup>[19]</sup>为

$$K_h = \frac{1}{R} \frac{1 - T_r T_g \omega^2}{(1 + T_g^2 \omega^2)(1 + T_r^2 \omega^2)} \quad (11)$$

由式(7)~(11)可得系统特征方程为

$$\left[ s^2 + \frac{(D + \alpha K_m + (1 - \alpha) K_h)s}{2H_1} + \frac{K_{d1} \omega_0}{2H_1} \right] \Delta \delta = 0 \quad (12)$$

则含水电、火电系统的阻尼比为

$$\xi_1 = \frac{D + \alpha K_m + (1 - \alpha) K_h}{2\sqrt{2H_1 K_{d1} \omega_0}} \quad (13)$$

假设阻尼比为正值, 即令式(13)大于零, 根据文献[19]中的参数设计, 若忽略负荷阻尼系数  $D$ , 当

水电占比 $\alpha$ 大于60%时,调速器阻尼转矩将由正变为负,则系统会出现超低频振荡现象。不同水电占比下系统振荡情况如图4所示,水电占比为100%时系统发生等幅超低频振荡,可知机组阻尼转矩系数 $K_m$ 、 $K_b$ 与水电占比 $\alpha$ 对系统的振荡情况具有决定作用。

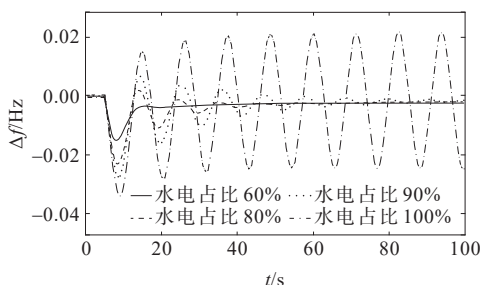


图4 不同水电占比下系统振荡情况

Figure 4 Oscillations with different hydropower ratios

综上所述,通过改变调速器参数可以在一定程度上减小机组的负阻尼系数,从而对超低频振荡起到一定的抑制作用。但是通过整定调速器的参数改变,会对机组响应能力造成影响,降低机组频率调节速度,并且在水电高占比情况下,仅依靠参数优化并不能从根本上消除机组的负阻尼特性,达到超低频振荡的抑制需求。基于此,考虑异步联网采用的基于柔性直流输电即电压源换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)系统具备频率支撑能力,且其可以为系统提供正阻尼,故可以作为弥补水电机组负阻尼特性的一项措施,以达到抑制超低频振荡的效果。

## 2 VSC-HVDC 系统输出控制方法

为了让柔性直流参与超低频振荡抑制过程,需要通过直流附加频率的方法对柔性直流输出进行控制。

### 2.1 VSC-HVDC 系统虚拟惯性与 $V_{dc}$ - $f$ 下垂特性

在交流系统中,当系统因出现功率不平衡量而导致频率出现波动时,同步发电机的转子运动方程为

$$\frac{2H}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = P_M - P_E = \Delta P_a \quad (14)$$

式中, $f_N$ 为电网额定频率; $P_M$ 为发电机机械功率; $P_E$ 为发电机电磁功率; $\Delta P_a$ 为发电机功率增量。

在VSC-HVDC系统中,通过直流电压的变化来反映有功功率的不平衡量<sup>[30-32]</sup>。换流站两侧功率不平衡可以通过直流电容进行补偿,其动态方程为

$$\frac{nCU_{DC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dU_{DC}}{dt} = P_i - P_o = \Delta P_2 \quad (15)$$

式中, $n$ 为换流站直流电容的个数; $C$ 为系统中的直流电容; $S_{VSC}$ 为换流站额定容量; $U_{DC}$ 为直流电压; $P_i$ 、 $P_o$ 分别为换流站的输入、输出功率; $\Delta P_2$ 为换流站功率增量。

将式(14)、(15)对比分析,可得交流侧的频率变化与直流侧的电压变化关系:

$$\frac{2H_{VSC}}{f_N} \cdot \frac{df}{dt} = \frac{nCU_{DC}}{S_{VSC}} \cdot \frac{dU_{DC}}{dt} \quad (16)$$

式中, $H_{VSC}$ 为变流站直流电容的虚拟惯性系数。

在系统对产生的扰动进行响应后,假设直流电压与频率偏差分别从稳态值过渡为 $U_{DC0}$ 和 $f_0$ 。基于此,对式(16)左、右两侧进行积分,可得:

$$\int_{f_s}^{f_0} \frac{2H_{VSC}}{f_N} df = \int_{U_{DCN}}^{U_{DC0}} \frac{nCU_{DC}}{S_{VSC}} dU_{DC} \quad (17)$$

$$\frac{2H_{VSC}}{f_N} (f_0 - f_N) = \frac{nC}{2S_{VSC}} (U_{DC0}^2 - U_{DCN}^2) \quad (18)$$

根据式(18)求取同步机惯性时间常数<sup>[24]</sup>,可得:

$$H_{VSC} = n \frac{CU_{DCN}^2}{2S_{VSC}} \cdot \frac{U_{DC0}^2 - U_{DCN}^2}{f_0 - f_N} \quad (19)$$

式中, $U_{DCN}$ 为直流电压的额定值。

同时将式(18)化简求解,可得:

$$U_{DC0} = \sqrt{M(f_0 - f_N) + U_{DCN}^2} \quad (20)$$

其中, $M$ 为频率-电压调节系数,当电网频率出现波动时,其反映换流站电压波动情况,即

$$M = 4H_{VSC}S_{VSC}/nCf_N \quad (21)$$

对式(20)进行泰勒公式展开,忽略二次及以上的高次项,可得:

$$U_{DC0} - U_{DCN} = M(f_0 - f_N)/2U_{DCN} \quad (22)$$

通过上述推导,可获取并定义VSC-HVDC系统的频率-电压下垂系数,即

$$K_{VSC} = 2H_{VSC}S_{VSC}/nCU_{DCN}f_N \quad (23)$$

由于电力系统的直流电压存在一定范围约束,过高的下垂系数设置将导致系统直流电压超出稳定运行范围,故应对系数 $K_{VSC}$ 进行约束,以保障系统稳定运行<sup>[30]</sup>。同时,由式(22)可得,当交流系统频率发生变化时,直流电压产生波动,对端换流站根据直流电压的偏差和幅度调整有功参考值,从而对端电网进行有功功率的补偿。

由于高水电占比侧交流系统与对端交流侧通过高压直流系统互联,因此两交流系统处于非同步运行,同时直流换流站装设有同步补偿设备,抑制谐波与振荡,振荡不会通过柔性直流输电传递至对



端交流系统,对端交流系统没有小扰动的功角稳定问题<sup>[33-34]</sup>。对端系统仅根据接收换流站传递的频率偏差信号,通过惯性或调速器来调节输出功率,经柔性直流联络线对高水电占比比例进行支援,从而起到超低频振荡抑制作用。

## 2.2 VSC-HVDC 系统参数约束

在电力系统运行过程中,直流电压的安全波动范围一般为额定值的5%<sup>[35]</sup>;在频率波动方面,国家标准 GB/T 15945—2008 中提出:电力系统正常运行条件下频率偏差绝对值应在0.2 Hz 以内,系统容量较小时可放宽至0.5 Hz。

为保障电力系统的稳定运行,且充分发挥 VSC-HVDC 系统的调频能力,直流电压波动范围取5% $U_{DCN}$ ,频率波动范围取0.4% $f_N$ 。结合式(22),有

$$K_{VSC} = 5\% U_{DCN} / 0.4\% f_N \quad (24)$$

将式(24)中 $U_{DCN}$ 和 $f_N$ 标么化,可以获取频率—电压下垂系数 $K_{VSC}$ 取值范围:

$$0 \leq K_{VSC} \leq 12.5 \quad (25)$$

将式(25)代入式(23),可以获取变流站直流电容的虚拟惯性系数 $H_{VSC}$ 取值范围:

$$0 \leq H_{VSC} \leq 12.5nCU_{DCN}f_N/2S_{VSC} \quad (26)$$

式(26)约束范围可以衡量 VSC-HVDC 系统对系统频率支撑能力的强弱。 $H_{VSC}$ 越大则其为系统补充的惯性越大,可以抑制频率的变化;根据 VSC 的输出特性可知, $K_{VSC}$ 越大表示直流运行特性下输出功率越多<sup>[36]</sup>,则其为系统提供的正阻尼越大,更有利于交流系统的稳定。

## 3 VSC-HVDC 系统超低频振荡抑制方法设计

当采用 VSC-HVDC 系统进行阻尼补偿以抑制超低频振荡时,需要考虑系统参数的约束,同时避免输电系统过度参与,造成能量的损失。

### 3.1 超低频振荡抑制方法

由文1阻尼转矩法分析可知,超低频振荡产生的本质是由于水电提供的负阻尼过大,因此通过换流站进行附加转矩控制来提供正阻尼,使得整个系统阻尼为正值,理论上能够抑制超低频振荡<sup>[37-38]</sup>。

根据水轮机的 $\Delta T_m$ 阻尼特性进行类比<sup>[23]</sup>,VSC-HVDC 附加转矩 $\Delta T_{dc}$ 等效分解为同步转矩 $H_{VSC}\Delta\delta$ 和附加阻尼转矩 $K_{VSC}\Delta\omega$ ,即

$$\Delta T_{dc} = H_{VSC}\Delta\delta + K_{VSC}\Delta\omega \quad (27)$$

假设无扰动发生,与分析水轮机组阻尼特性类

似,将式(27)代入式(5),可得系统特征方程:

$$\left[ s^2 + \frac{(D + K + K_{VSC})s}{2H_1 + H_{VSC}} + \frac{K_{d2}\omega_0}{2H_1 + H_{VSC}} \right] \Delta\delta = 0 \quad (28)$$

设 $K = \alpha K_m + (1 - \alpha)K_h$ ,通过式(28),可得系统阻尼比:

$$\xi_2 = \frac{D + \alpha K_m + (1 - \alpha)K_h + K_{VSC}}{2\sqrt{(2H_1 + H_{VSC})K_{d2}\omega_0}} \quad (29)$$

通过水电和柔性直流工作原理构建含有水轮机组、VSC-HVDC 系统以及发电机的频率响应模型,如图5所示, $\Delta P_L$ 为负荷扰动;将该模型简化,可得简化后的频率响应模型,如图6所示。

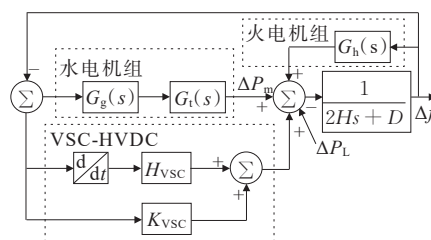


图5 系统频率响应模型

Figure 5 System frequency response model

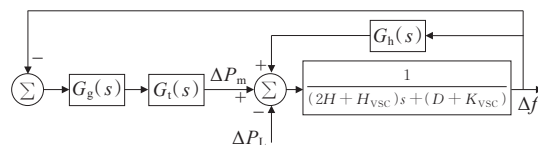


图6 简化的系统频率响应模型

Figure 6 Simplified system frequency response model

通过式(29)可知,在研究系统的阻尼特征时,当火电参数固定且占比一定时,系统的阻尼特性由 $K_m$ 和 $K_{VSC}$ 共同主导, $K_m$ 表现水轮机组的负阻尼特性,其在低频段为负数,而 $K_{VSC}$ 为VSC-HVDC系统的下垂特性,为系统提供正阻尼。由此可知,若 $K_{VSC}$ 可以取合适大小的数值,可以对 $K_m$ 有一定的抵消,可以视为VSC-HVDC系统对水轮机组的负阻尼进行补偿,降低系统出现由水轮机组引发的超低频振荡的可能。

### 3.2 VSC-HVDC 系统参数设计

#### 1) $K_{VSC}$ 参数选取。

在其他参数固定时, $K_m$ 如式(9)为一条曲线,其数值随系统频率变化而变化,若直接将 $K_{VSC}$ 设置为 $-K_m$ ,则 $K_{VSC}$ 在实际频率响应过程中会出现频繁的调整,给实际操作带来困难。因此,可将 $K_{VSC}$ 直接设置为 $K_m$ 最大值的绝对值,即 $K_{VSC} = |K_m|_{\max}$ ,则不论系统频率如何波动,均可视为VSC-HVDC系统将水轮机组的负阻尼完全补偿,系统不会再出现由水轮

机组引发的超低频振荡问题。然而,水轮机组的阻尼转矩系数  $K_m$  会受到调速器的比例积分参数以及水锤效应时间常数的影响,导致其绝对值有超出  $K_{VSC}$  取值范围的可能,此时 VSC-HVDC 系统将无法对水轮机组的负阻尼进行完全补偿。

由图 2、3 已知,  $|K_{m|max}$  主要受调速器的参数设置影响,调速器参数比值越大则  $|K_{m|max}$  越大,故仅需将水轮机组正常运行的初始调速器参数比值设置合理,则可保障其负阻尼处于 VSC-HVDC 系统可完全补偿的范围。若通过调速器参数设置无法使  $|K_{m|max}$  处于  $K_{VSC}$  的可调范围,则  $K_{VSC}$  直接取最大值,最大程度上抑制超低频振荡。

2)  $H_{VSC}$  参数选取。

$H_{VSC}$  可以提高系统的惯性,有效提高系统的稳定性,故直接选取其约束范围内的最大值参与系统调频,以充分发挥 VSC-HVDC 系统对频率波动的抑制能力。

上述参数的选取可以离线完成,通过电力系统运行的历史情况获取系统参数,求取阻尼转矩系数并根据具体情况调整调速器参数,随后获取  $|K_{m|max}$  并与  $K_{VSC}$  取值范围进行比较,最后完成参数设置。当系统频率出现波动时,直接采用选取的参数在线响应,由此可得系统运行流程,如图 7 所示。

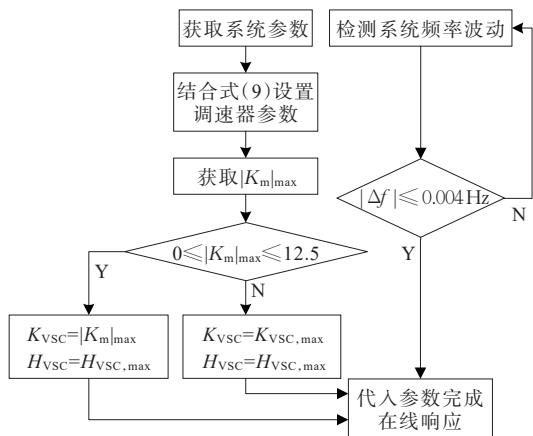


图 7 运行流程

Figure 7 Operation flow chart

### 4 仿真分析

在 MATLAB/SIMULINK 中构建含水电、火电和 VSC-HVDC 的一次调频模型进行仿真分析。通过对比不同水电开机比例下调速器参数优化和 VSC-HVDC 参与系统频率调节的超低频振荡抑制效果,验证所提方法的有效性。

### 4.1 机组及调速器参数设置

参考文献[28],以西南电网为例,电网结构如图 8 所示,德宝直流送出通道将川渝电网与西北电网相连;复奉、锦苏、宾金 800 kV 直流通道将川渝电网与华东电网相连;渝鄂 500 kV 背靠背直流工程将川渝电网与华中电网相连。其中,以渝鄂背靠背直流系统为例,仿真设置西南电网水电占比 70% 和 90% 这 2 种高占比的情况;水轮机组调速器为 PID 型,直联联络线采用附加频率控制,模型为 BPA 用户手册 DS-7 模型,对系统进行一次调频。水电与火电机组相关参数如表 1 所示。

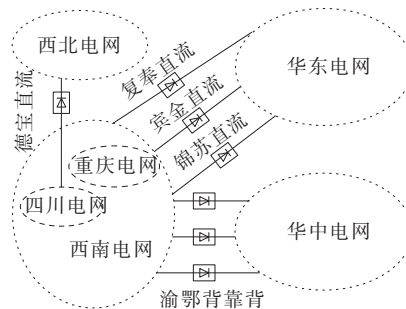


图 8 电网结构

Figure 8 Grid structure

表 1 系统参数取值

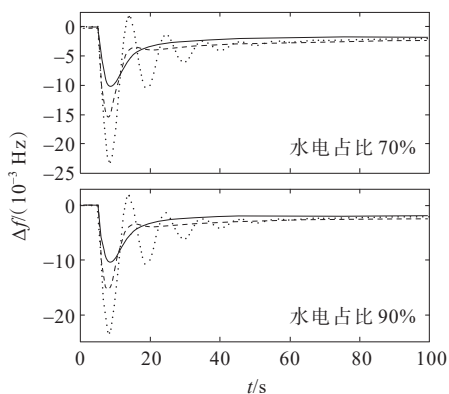
Table 1 System parameter values

$T_y/$ s	$b_p/$ (p.u. · Hz <sup>-1</sup> )	$T_w/$ s	$R/$ (p.u. · Hz <sup>-1</sup> )	$T_g/$ s	$T_i/$ s	$M/$ (kg · m <sup>2</sup> )	$D/$ s
2	0.05	3	0.05	0.1	0.2	5.9	2.75

### 4.2 仿真分析

第 5 s 时发生阶跃扰动为 0.1 p.u. 的负荷扰动,根据文献[11]设定调速器比例与积分参数,将调速器参数设为  $K_p=2.77$ 、 $K_i=0.56$ 、 $b_p=0.05$ ,系统出现临界振荡,当振荡频率高于临界频率时,水电调速系统将提供负阻尼。

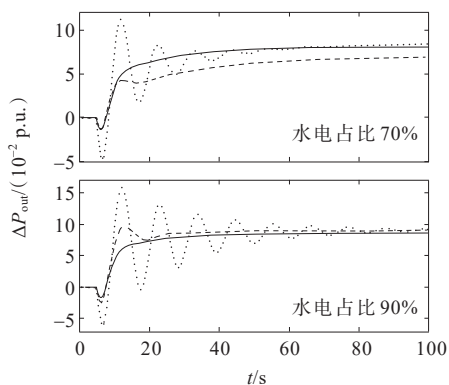
由于水电占比超过 60% 时易发生超低频振荡,故分别设定水电占比为 70% 和 90%,通过对比 PID 参数优化的调节效果,对 VSC-HVDC 调频性能进行验证。不同占比下设定不同的  $H_{VSC}$ 、 $K_{VSC}$ ,以抑制超低频振荡现象,具体大小根据文 3.2 中方法更新计算。另外,直流频率控制的 PID 参数设置利用原始参数值,PID 参数优化方法根据文献[15]可得,比例与积分参数的比值较小时会引起阻尼转矩系数小,从而使调速器提供负阻尼,因此根据仿真验证,本文调节 PID 参数,分别设置  $K_p=3.65$ 、 $K_i=0.38$ 。仿真结果如图 9~13 所示。



—直流频率控制 --PID 参数优化·····原始参数

图 9 频率偏差

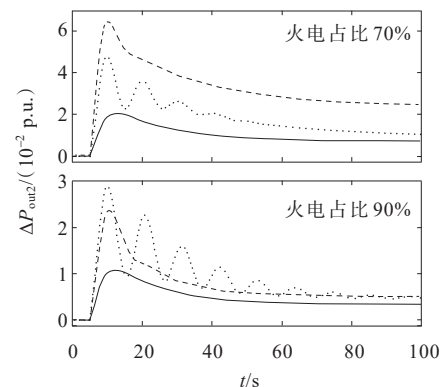
Figure 9 Frequency deviation



—直流频率控制 --PID 参数优化·····原始参数

图 10 水电功率增量

Figure 10 Hydropower power increment



—直流频率控制 --PID 参数优化·····原始参数

图 11 火电功率增量

Figure 11 Thermal power increment

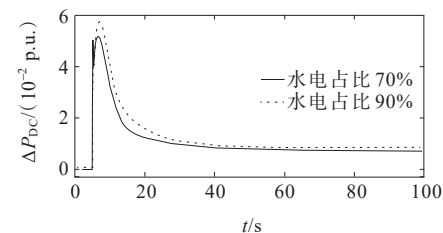


图 12 直流功率增量

Figure 12 DC power increment

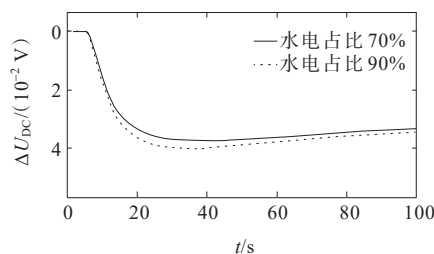


图 13 直流电压偏差

Figure 13 DC voltage deviation

由图 9~13 仿真结果显示,直流系统能够较好地抑制超低频振荡,在水电占比为 70% 时,系统出现轻微的超低频振荡现象。VSC-HVDC 的参与能明显抑制,而 PID 参数优化在一定程度上能抑制超低频振荡现象,但频率偏差与初始频率变化率明显大于所提策略的调节效果。从水电输出功率可以看出,所提方法与 PID 参数优化在初始阶段都有效抑制水电功率反向调节,但 PID 优化方法依然会使水电功率出现略微振荡现象,并且主要依靠火电提供正阻尼。本文所提方法具有功率调节的快速性,因此水电负阻尼特性得到快速补偿。在直流参与的过程中,直流功率调制速度较快,且直流电压偏差小于 0.05,处于安全运行范围内。

当水电占比设定为 90% 时,系统出现较为剧烈的超低频振荡现象,此时仅仅依靠 PID 参数优化方法无法完全抑制。而 VSC-HVDC 能够在水电占比比较高情况下,适当调节  $K_{VSC}$ 、 $H_{VSC}$ ,从而有效抑制超低频振荡现象,水电功率反向调节减少,正向调节功率也不再振荡,能够达到平稳的输出。

另外,根据图 12、13 可以看出,在不同水电占比下, $H_{VSC}$ 、 $K_{VSC}$  能够适当调节,使得直流功率略增以应对高水电占比下的负阻尼;同时可以反映出高水电占比能够提供充足的正阻尼,并且直流调制速度较快,迅速反应频率的波动。在调节过程中,直流电压偏差都小于 0.05,在额定范围内,不会威胁到直流系统的正常运行。

## 5 结语

为了解决高水电占比电力系统可能出现的超低频振荡问题,本文从增加系统阻尼的角度提出了一种考虑 VSC-HVDC 参与超低频振荡抑制的控制策略。通过理论分析与仿真验证,得到结论如下:

1) 根据换流站功率输出特性,设计附加频率控制能够较好地抑制超低频振荡,且直流电压偏差保持在额定范围内。

2) 在不同水电占比下,所提供的附加阻尼不同,因此在参与超低频振荡抑制过程中,换流站直流虚拟惯性参数 $K_{VSC}$ 、 $H_{VSC}$ 能够自适应调节参数,提供适当的阻尼。

3) VSC-HVDC 系统在不同水电占比下均能表现出较好的抑制效果,同时直流输出具有较好的稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 刘云.我国能源电力发展及火电机组灵活性改造综述[J]. 洁净煤技术,2023,29(增刊2):319-327.  
LIU Yun. Overview of energy and power system development and the flexibility retrofit of thermal power units in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, 29(sup 2): 319-327.
- [2] 张子扬,张宁,杜尔顺,等.双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1): 1-25.  
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25.
- [3] 王帆,赵路新,路鹏程,等.柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(9): 13-20.  
WANG Fan, ZHAO Luxin, LU Pengcheng, et al. A power operation interval control method for flexible DC transmission system under low short-circuit ratio[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 13-20.
- [4] 孙银锋,刘金鑫,梁栋.基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 智慧电力,2023,51(10):85-92.  
SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 85-92.
- [5] 张俊涛,程春田,于申,等.水电支撑新型电力系统灵活性研究进展、挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2024, 44(10):3862-3885.  
ZHANG Juntao, CHENG Chuntian, YU Shen, et al. Progress, challenges and prospects of research on hydropower supporting the flexibility of new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3862-3885.
- [6] 李莹,富亚洲,王官宏,等.电力系统超低频频率振荡分析及扰动源定位[J]. 电网技术,2023,47(5):1770-1780.  
LI Ying, FU Yazhou, WANG Guanhong, et al. Ultra-low frequency oscillation analysis and location in power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1770-1780.
- [7] 段敬东,凌世河,肖玲娟,等.“双碳”目标下我国大型水电可持续发展经济性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023,54(增刊2):344-348.  
DUAN Jingdong, LING Shihe, XIAO Lingjuan, et al. Based on the "double carbon" target economic research of large hydropower for sustainable high-quality development[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(sup 2): 344-348.
- [8] 李璐,张泽端,毕贵红,等.“双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(12):69-81.  
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with "dual carbon" targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81.
- [9] 韩宇奇,刘立扬,鲁宗相,等.考虑多目标协同的“水光充储”配电网优化规划方法[J]. 供用电,2024,41(8): 100-111.  
HAN Yuqi, LIU Liyang, LU Zongxiang, et al. Optimal planning method of "hydropower, photovoltaic, charging and storage" distribution network considering multi-objective coordination[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 100-111.
- [10] 李进,蔡泽祥,岑伯维,等.基于功率能量特性的含小水电微电网储能容量配置方法[J]. 电力建设,2024,45(4): 123-133.  
LI Jin, CAI Zexiang, CEN Bowei, et al. Energy storage capacity configuration method for microgrids containing small hydropower based on power-energy characteristics [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 123-133.
- [11] 邓伟,王德林,魏蒙希,等.水轮机调速器参数对电力系统超低频振荡的影响[J]. 电网技术,2019,43(4):1371-1377.  
DENG Wei, WANG Delin, WEI Mengxi, et al. Influencing mechanism study on turbine governor parameters upon ultra-low frequency oscillation of power system[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1371-1377.
- [12] 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.
- [13] 高建瑞,李国杰,汪可友,等.电力系统超低频振荡的阻尼与同步转矩分析[J]. 电网技术,2020,44(3):1001-1007.  
GAO Jianrui, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Damping torque and synchronous torque analysis of power system ultra-low frequency oscillation[J]. Power System



- Technology,2020,44(3):1001-1007.
- [14] 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.  
SHI Huabo, CHEN Gang, DING Lijie, et al. PID parameter optimization of hydro turbine governor considering the primary frequency regulation performance and ultra-low frequency oscillation suppression[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 221-226.
- [15] 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.
- [16] 易建波,张国洲,张鹏,等.超低频振荡阻尼控制中的水轮机调速系统参数双层优化策略[J].电工技术学报,2022,37(5):1219-1228.  
YI Jianbo, ZHANG Guozhou, ZHANG Peng, et al. Two-layer optimization strategy of hydraulic turbine governing system parameters in ultra-low frequency oscillation damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1219-1228.
- [17] 孟宪影,刘天琪,李兴源,等.水轮机调速系统对电力系统阻尼特性影响分析[J].武汉大学学报(工学版),2017,50(4):556-559.  
MENG Xianying, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of impact of hydraulic turbine governing system on damping characteristics of power system[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2017, 50(4): 556-559.
- [18] 杜夏冰.水电机组经高压直流输电外送系统多频段振荡模式研究[D].北京:华北电力大学,2022.  
DU Xiabing. Research on modal of multi-frequency oscillation of hydro generator integration through HVDC system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [19] 杨若朴,陈亦平,李崇涛,等.考虑不同水电比例的多机系统调速器优化策略[J].电网技术,2023,47(2):510-518.  
YANG Ruopu, CHEN Yiping, LI Chongtao, et al. Optimization strategy of governor for multi machine system considering different hydro power ratios[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 510-518.
- [20] 汪康康,孙昕炜,周波,等.基于压缩空气储能附加阻尼控制的电力系统低频振荡抑制策略[J].中国电力,2023,56(10):115-123.  
WANG Kangkang, SUN Xinwei, ZHOU Bo, et al. Low-frequency oscillation suppression strategy for power system based on supplementary damping control of compressed air energy storage[J]. Electric Power, 2023, 56(10): 115-123.
- [21] WANG G, XU Z, GUO X, 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.
- [22] 何胜明,张健,段贵金,等.水轮机调速器不同控制模式对电网超低频振荡影响分析[J].水电能源科学,2023,41(12):195-199.  
HE Shengming, ZHANG Jian, DUAN Guijin, et al. Analysis of ultra-low frequency oscillation mechanism of hydraulic turbine governor under different control modes[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(12): 195-199.
- [23] 李建,王彪,刘程卓,等.基于直流频率限制控制器的超低频振荡抑制方案[J].高电压技术,2019,45(7):2126-2133.  
LI Jian, WANG Biao, LIU Chengzhuo, et al. Suppression scheme for ultra-low frequency oscillation based on frequency limit controller[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2126-2133.
- [24] SHI H, WANG Y, SUN X, et al. Stability characteristics analysis and ultra-low frequency oscillation suppression strategy for FSC-VSPSU[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109623.
- [25] SHI X, RUAN G, LU H, et al. Analysis of ultra-low frequency oscillation in hydro-dominant power system and suppression strategy by GPSS[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 2796-2806.
- [26] 刘文龙,耿光超,陈义宣,等.抑制超低频振荡的储能控制策略[J].电网技术,2020,44(5):1689-1696.  
LIU Wenlong, GENG Guangchao, CHEN Yixuan, et al. Control strategy of energy storage system for ultra-low frequency oscillations suppression[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1689-1696.
- [27] 何廷一,束洪春,李胜男,等.风电参与调频对电力系统超低频振荡的影响分析[J].可再生能源,2023,41(8):1113-1121.  
HE Tingyi, SHU Hongchun, LI Shengnan, et al. Analysis of the influence of wind power participating in frequency regulation on the ultra-low frequency oscillation of power system[J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(8): 1113-1121.
- [28] 刘程卓,王渝红,王彪,等.基于系统暂态能量函数及直流灵敏度排序的多直流调制协调策略[J].中国电机工程学报,2018,38(21):6295-6304+6491.  
LIU Chengzhuo, WANG Yuhong, WANG Biao, et al. Multi-HVDC modulations coordination based on DC sensitivity sequence and system transient energy function [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6295-6304+6491.

- [29] 陈平,杜文娟.基于新能源下混合风电场不同类型风机动态特性相似环节引起的振荡风险研究[J].电测与仪表,2024,61(12):114-124.  
CHEN Ping,DU Wenjuan.Study on the risk of oscillation caused by similar links in the dynamic characteristics of different types of wind turbines in hybrid wind farms based on new energy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2024,61(12):114-124.
- [30] 李从善,甄子凯,和萍,等.风电与多端柔性直流输电系统自适应分频协调控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(1):65-73+92.  
LI Congshan,ZHENG Zikai,HE Ping,et al.Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi-terminal flexible HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(1):65-73.
- [31] 汝冬,蔺红.改善惯性响应与一次调频的风电全直流系统协调控制策略[J].电力工程技术,2024,43(3):52-62.  
RU Dong,LIN Hong.Coordinated control strategy for improving inertial response and primary frequency modulation in wind power full DC system[J]. Electric Power Engineering Technology, Electric Power Engineering Technology,2024,43(3):52-62.
- [32] 王耀函,张扬帆,赵庆旭,等.低电压穿越过程中风电机组载荷特性联合仿真研究[J].发电技术,2024,45(4):705-715.  
WANG Yaohan,ZHANG Yangfan,ZHAO Qingxu,et al. Joint simulation study on load characteristics of wind turbines in low voltage ride through process[J]. Power Generation Technology,2024,45(4):705-715.
- [33] 刘一锋.计及柔性交/直流输电装备影响的LCC-HVDC系统振荡机理与抑制策略研究[D].长沙:湖南大学,2022.  
LIU Yifeng. Research on oscillation mechanism and suppression strategy of LCC-HVDC system considering influence of flexible AC/DC transmission equipment[D]. Changsha:Hunan University,2022.
- [34] 李长宇,刘博昊,肖仕武,等.基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制送端火电机组次同步振荡研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):20-27+73.  
LI Changyu,LIU Bohao,XIAO Shiwu,et al.Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(2): 20-27+73.
- [35] LIU Y, HU J, SHI J, et al. Adaptive integrated control strategy for MMC-MTDC transmission system considering dynamic frequency response and power sharing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2023,147:108858.
- [36] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1):21-29.
- [37] 高琴,陈亦平,朱林,等.多直流异步互联系统中频率限制器的控制策略优化设计[J].电力系统自动化,2018,42(12):167-172.  
GAO Qin,CHEN Yiping,ZHU Lin,et al.Strategy design of frequency limit controller on multi-HVDC asynchronous interconnected power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(12): 167-172.
- [38] 王菲,刘建琴,韩丰,等.应用直流调制改善水电能源基地交流电网运行特性[J].电网技术,2017,41(12):3911-3916.  
WANG Fei,LIU Jianqin,HAN Feng,et al.Application of DC modulation to improving operation characteristics of hydropower base grid[J]. Power System Technology, 2017,41(12): 3911-3916.