

电网运行

构网型柔性直流对受端交流系统低频振荡的影响分析

王龙飞¹, 杨滢¹, 赵乐冰¹, 马富艺龙², 高晖胜²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014;
2. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 构网型柔直受端换流站采用模拟同步机的直流电压自同步控制策略, 易影响受端系统的低频振荡特性。为此, 提出一种基于等效阻尼转矩的系统低频振荡特性分析方法, 分析构网型柔直控制参数对受端系统低频振荡的影响。首先, 依据构网型柔直控制策略构造虚拟转子, 推导了等效阻尼转矩模型; 其次, 基于各阻尼转矩分量的频率响应曲线, 分析了自同步控制环与电压控制环等参数对等效阻尼转矩的影响。最后, 基于 MATLAB/Simulink 进行了时域仿真验证, 结果表明, 增加等效阻尼系数、电压控制增益等措施有利于提升等效阻尼转矩分量, 对受端交流系统低频振荡具有改善作用。

关键词: 直流电压自同步控制; 柔性直流; 低频振荡; 阻尼转矩法; 构网型控制

DOI: 10.19585/j.zjdl.202602001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impact analysis of grid-forming VSC-HVDC system on low-frequency oscillations of receiving-end AC power system

WANG Longfei¹, YANG Ying¹, ZHAO Lebing¹, MA Fuyilong², GAO Huisheng²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The receiving-end converter station of a grid-forming VSC-HVDC system adopts a DC-voltage self-synchronizing control strategy that emulates the behavior of a synchronous generator, which may affect the low-frequency oscillatory characteristics of the receiving-end AC system. To address this issue, this paper proposes an analysis method based on equivalent damping torque to investigate how grid-forming control parameters influence system oscillatory behavior. First, a virtual rotor equation is established according to the grid-forming (GFM) control strategy, and an equivalent damping torque model is derived. Second, by examining the frequency-response curves of the damping torque components, the influence mechanisms of parameters in the self-synchronizing loop and the voltage-control loop on the equivalent damping torque are revealed. Finally, time-domain simulations are performed in MATLAB/Simulink for validation. The results show that appropriately increasing the equivalent damping coefficient and the voltage-control gain enhances the equivalent damping torque components, thereby effectively suppressing low-frequency oscillations in the receiving-end AC system.

Keywords: DC-voltage self-synchronizing control; VSC-HVDC; low-frequency oscillation; damping torque analysis; grid-forming (GFM) control

0 引言

为了确保我国如期实现“碳达峰、碳中和”的宏伟目标, 加快构建以新能源为主体的新型电力

系统是重要举措^[1]。为了实现新能源的远距离外送与消纳, 通常将汇集后的新能源通过高可控性的柔性直流输送至受端电网。所馈入的大容量柔直换流站一般对受端电网稳定特性存在不容忽视的影响^[2]。

目前受端柔直换流站大多采用跟网型定直流电压控制方式^[3-5], 以传输新能源等外来功率为目标。然而, 现有研究与运行实践表明, 受端电网

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY24E070003); 国网浙江省电力有限公司科技项目(B311DS240015)

可能难以承载大容量跟网型柔直^[4]，尤其在多馈入跟网型柔直的场景中存在较高的振荡失稳风险。文献[6]研究了含跟网型柔直的受端电网强弱对交流系统稳定性的影响，时域仿真说明了电网短路比或多馈入短路比不足^[7]可能导致跟网型柔直发生功率振荡。

由于考虑到跟网型柔直并不具备主动电压构建能力^[7]，近年来国内外学者探索了构网型柔直的技术路线。构网型控制技术在发挥装备功率传输作用的同时，还能够模拟同步发电机的运行特性^[8-11]，使装备具有主动支撑受端电网的能力。目前，受端柔直换流站所采用的构网型控制策略为直流电压自同步控制方式，利用直流侧电容动态与同步发电机转子运动之间的等效关系，同时实现直流电压恒定与并网同步两个控制目标，甚至具备向无源网络供电的能力^[12-14]，有望避免大容量跟网型柔直馈入受端弱电网的诸多稳定问题。

直流电压自同步控制下的构网型柔直大多包含多时间尺度控制环路，其动态容易与交流系统的同步机组相互耦合^[15]。现有研究已表明，由于构网型控制往往通过模拟同步机特性实现，可能对同步机为主的交流系统低频振荡模式产生影响^[16-18]。例如，文献[17]采用时域特征值分析说明了构网型储能变流器可能恶化交流系统的低频振荡模式；文献[19-23]利用频域阻抗分析法说明了构网型风机多环路控制存在负阻尼特性，可能与同步机的机电振荡模式共振；文献[24]采用时域特征值法分析了虚拟同步控制下的构网型风机参数对交流系统低频振荡的影响。然而，现有文献主要集中于研究采用虚拟同步机控制策略的构网型风机、储能在强电网下的低频振荡现象，目前尚无针对构网型柔直系统对受端电网中的振荡特性影响的研究。未来在受端电网空心化趋势下，构网型柔直可为受端交流系统提供灵活的无功调节与电压支撑作用，其影响亟待深入研究^[27]。

为此，本文首先建立直流电压自同步控制下构网型柔直的动态模型，采用阻尼转矩法构造虚拟转子；其次，分析构网型柔直的阻尼转矩特性，并重点探讨其多个控制回路参数对各等效转矩分量的影响；最后，通过特征值分析与时域仿真验证了稳定性分析的有效性和所得结论的正确性。

1 自同步控制下构网型柔直的动态建模

1.1 构网型柔直典型并网结构与控制方程

文中所提的构网型柔直的并网控制策略如图1所示。图中，主电路部分构网型柔直经LC滤波器与线路阻抗接入电网；控制部分包含直流电压自同步控制回路与无功控制回路，以实现构网型柔直发挥功率传输作用的同时，还能够保证直流电容电压恒定与并网同步。

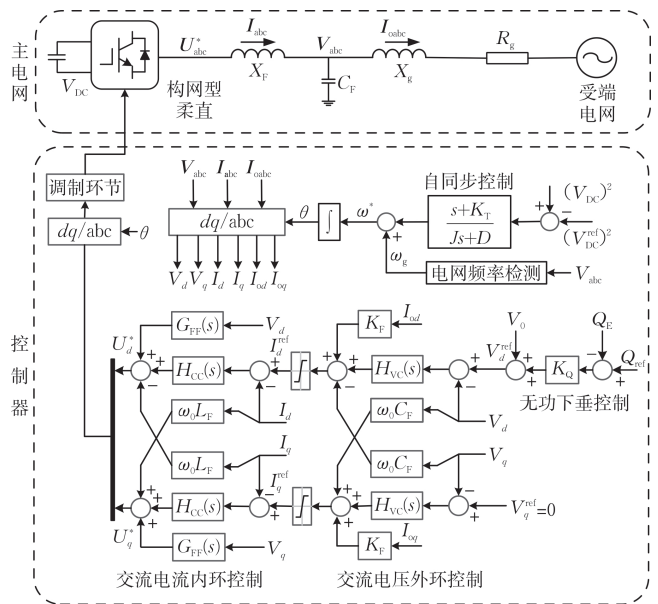


图1 构网型柔直控制框图

Fig.1 Control block diagram of the grid-forming VSC-HVDC system

具体地，图中主电路部分 $X_F = \omega_0 L_F$ 为滤波电抗， $\omega_0 = 100\pi$ rad/s 为同步角频率， C_F 为交流侧滤波电容， R_g 和 L_g 分别为电网线路电阻与电感， V_{abc} 和 I_{abc} 分别为滤波电容电压矢量与滤波电感电流矢量， I_{oabc} 为构网型柔直输出电流矢量。

直流电压自同步控制方程为：

$$\omega = \omega_g + \frac{s + K_T}{J_s + D} \left[(V_{DC})^2 - (V_{DC}^{ref})^2 \right] \quad (1)$$

$$\delta = \theta - \theta_g, s\theta = \omega_0 \omega \quad (2)$$

式中： J 为惯量模拟系数； D 为阻尼系数； K_T 为直流电压跟踪系数，主要用于调节直流电压同步控制回路的响应速度^[25]； ω 为构网型柔直的内角频率（即用于三相 abc 坐标系到控制器 dq 坐标系 Park 变换的旋转角频率）； θ 为坐标变换角； δ 记为构网型柔直的虚拟功角； ω_g 为频率参考值，由基于锁

相环的电网频率检测环节生成; V_{DC}^{ref} 为直流电压参考值; V_{DC} 为直流母线电容的电压。

V_{DC} 的动态方程为:

$$sC_{DC}V_{DC} = \frac{P_S}{V_{DC}} - \frac{P_E}{V_{DC}} \quad (3)$$

式中: C_{DC} 为直流电容值; P_S 为直流侧功率, 对于构网型柔直的 P_S 取零; P_E 为直流电容输出到交流侧有功功率。

在自同步控制策略下, 构网型柔直即使没有同步机一样的机械转子, 也可以结合直流电容的动态对同步机摇摆方程的模拟并同时实现直流电压控制与并网同步。由于本文聚焦于构网型柔直在 0.1~2 Hz 频段的低频功率振荡问题, 其动态过程的时间尺度通常在秒级(1~10 s)。构网型柔直的直流电压控制环带宽通常在 10~20 Hz 量级, 其响应时间在几十至一百毫秒(0.01~0.1 s)之间^[27]。由于直流电压控制的动态过程(快动态)比所研究的低频振荡(慢动态)快一到两个数量级, 因此在分析低频振荡时, 可以认为直流电压控制环已快速跟踪其指令值并进入准稳态, 即在慢时间尺度上近似为零^[30]。因此, 结合式(1)~(3)可得:

$$J_{\text{eq}}s\omega + D_{\text{eq}}(\omega - \omega_g) - (P_S - P_E) = \frac{K_T C_{DC}}{2} [(V_{DC})^2 - (V_{DC}^{\text{ref}})^2] \approx 0 \quad (4)$$

式中: 等效惯性系数 $J_{\text{eq}} = JC_{DC}/2$; 等效阻尼系数 $D_{\text{eq}} = DC_{DC}/2$ 。

式(4)说明了, 与基于转子运动方程的同步机同步过程相比, 直流电压自同步控制下的构网型柔直也具有类似的同步机制。

无功-电压下垂控制方程为:

$$V_d^{\text{ref}} - V_0 = K_Q(Q^{\text{ref}} - Q_E) \quad (5)$$

式中: V_d^{ref} 为无功-电压下垂控制输出的内电势 d 轴分量参考值; V_0 为下垂控制的电压设定值; K_Q 为下垂系数; Q_0 为下垂控制的无功功率设定值; Q_E 为构网型柔直的实际输出的无功功率。

交流电压外环控制方程为:

$$\begin{cases} I_d^{\text{ref}} = k_F I_{od} + G_{VCL}(s)(V_d^{\text{ref}} - V_d) - \omega_0 C_F V_q \\ I_q^{\text{ref}} = k_F I_{oq} + G_{VCL}(s)(V_q^{\text{ref}} - V_q) + \omega_0 C_F V_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: $G_{VCL}(s)$ 为电压外环 PI 控制器传递函数; V_d 和 V_q 分别为滤波电容电压的 d 轴与 q 轴分量; V_d^{ref} 和 V_q^{ref} 分别为滤波电容电压的 d 轴与 q 轴分量参考值, 其中 V_d^{ref} 由式(5)中的无功-电压下垂控

制给出, V_q^{ref} 一般取零; I_{od} 和 I_{oq} 分别为构网型柔直输出电流的 d 轴与 q 轴分量; I_d^{ref} 和 I_q^{ref} 分别为电流内环控制的 d 轴与 q 轴分量参考值; k_F 为输出电流前馈系数。

电流内环控制方程为:

$$\begin{cases} U_d^* = G_{VFF}(s)V_d + G_{CCL}(s)(I_d^{\text{ref}} - I_d) - \omega_0 L_F I_q \\ U_q^* = G_{VFF}(s)V_q + G_{CCL}(s)(I_q^{\text{ref}} - I_q) + \omega_0 L_F I_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: $G_{CCL}(s)$ 为电流内环 PI 控制器传递函数; $G_{VFF}(s)$ 为电压前馈滤波器传递函数; U_d^* 和 U_q^* 分别为 PWM 环节电压的 d 轴与 q 轴分量参考值; I_d 和 I_q 分别为滤波电感电流的 d 轴与 q 轴分量。

1.2 线性化动态建模

为了分析构网型柔直对系统振荡稳定性的影响, 本节将构网型柔直的控制方程与主电路方程在平衡点处线性化, 得到动态模型。

首先, 将滤波器等主电路动态用空间矢量和复传递函数^[22]建模, 如下所示:

$$\Delta \vec{U}^* - \Delta \vec{V} = \underbrace{(sL_F + j\omega L_F)}_{Z_{LF}(s)} \Delta \vec{I} \quad (8)$$

$$\Delta \vec{I} - \Delta \vec{I}_o = \underbrace{(sC_F + j\omega C_F)}_{Z_{CF}(s)} \Delta \vec{V} \quad (9)$$

$$\Delta \vec{V} - \Delta \vec{U} = \underbrace{(R_g + sL_g + j\omega L_g)}_{Z_g(s)} \Delta \vec{I}_o \quad (10)$$

式中: Δ 为小信号微增量; $\vec{V} = V_d + jV_q$ 为滤波电容电压矢量; $\vec{U}^* = U_d^* + jU_q^*$ 为变流器电压矢量; $\vec{I} = I_d + jI_q$ 为滤波电感电流矢量; $\vec{I}_o = I_{od} + jI_{oq}$ 为构网型柔直输出电流矢量; $\vec{U} = U_d + jU_q = Ue^{-j\delta}$ 为控制器 dq 坐标系下的电网电压矢量(U 为电网电压幅值, 无穷大电网电压满足 $\Delta U = 0$)。

根据复传递函数的表达式与传递函数矩阵表达式之间的转换关系^[22], 其线性化结果可写为(下标 0 表示该变量的稳态值):

$$\Delta U_d + j\Delta U_q = \Delta(Ue^{-j\delta}) = -jUe^{-j\delta_0} \Delta\delta \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta U_d \\ \Delta U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U \sin \delta_0 \\ -U \cos \delta_0 \end{bmatrix} \Delta\delta \quad (11)$$

将式(6)、(7)也采用这种空间矢量和复传递函数建模并线性化, 与式(8)~(10)联立可得:

$$\Delta \vec{I}_g = Y(s)G_U(s)\Delta \vec{V}^{\text{ref}} - Y(s)\Delta \vec{U} \quad (12)$$

式中: $\vec{V}^{\text{ref}} = V_d^{\text{ref}} + jV_q^{\text{ref}}$ 为电容电压参考值矢量;

$Y(s)$ 和 $G_U(s)$ 为主电路参数以及电压-电流内环控制参数相关的传递函数,具体表达式分别如下:

$$Y(s)=[G_1(s)+Z_G(s)]^{-1} \quad (13)$$

$$G_1(s)=[Z_{LF}(s)+G_{CCL}(s)-G_{CCL}(s)k_F-j\omega L_F]\times [(Z_{LF}(s)+G_{CCL}(s)-j\omega L_F)Z_{CF}(s)+G_{CCL}(s)G_{VCL}(s)+1-j\omega C_F G_{CCL}(s)-G_{VFF}(s)]^{-1} \quad (14)$$

$$G_U(s)=G_{CCL}(s)G_{VCL}(s)\times [(Z_{LF}(s)+G_{CCL}(s)-j\omega L_F)Z_{CF}(s)+G_{CCL}(s)G_{VCL}(s)+1-G_{CCL}(s)j\omega C_F-G_{VFF}(s)]^{-1} \quad (15)$$

然后式(12)结合式(9)~(11)的线性化结果导出以电压幅值-相角为变量的传递函数矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{I} \\ \Delta \vec{V} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}}_{G(s)} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{aligned} G_{11}(s) &= [(Z_{CF}(s)Z_G(s)+1)Y(s)+Z_{CF}(s)]jUe^{-j\theta_0}, \\ G_{12}(s) &= (Z_{CF}(s)Z_G(s)+1)Y(s)G_U(s), \\ G_{21}(s) &= (Y(s)Z_G(s)+1)jUe^{-j\theta_0}, \\ G_{22}(s) &= Y(s)Z_G(s)G_U(s). \end{aligned} \quad (17)$$

为了便于上述电流-电压动态方程与构网型柔直功率控制方程联立,进一步考虑其有功功率与无功功率动态为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_E \\ \Delta Q_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{d0} & I_{d0} \\ V_{q0} & -I_{q0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta V_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{q0} & I_{q0} \\ -V_{d0} & I_{d0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_q \\ \Delta V_q \end{bmatrix} \quad (18)$$

将式(18)代入式(16)中得到以构网型柔直功率-电压变量之间的小信号动态关系:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_E \\ \Delta Q_E \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} S_{11}(s) & S_{12}(s) \\ S_{21}(s) & S_{22}(s) \end{bmatrix}}_{S(s)} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V_d^{\text{ref}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:

$$S(s) = \begin{bmatrix} V_{d0} & I_{d0} \\ V_{q0} & -I_{q0} \end{bmatrix} \text{Re}\{G(s)\} + \begin{bmatrix} V_{q0} & I_{q0} \\ -V_{d0} & I_{d0} \end{bmatrix} \text{Im}\{G(s)\} \quad (20)$$

为了进一步考虑构网型柔直直流电压自同步控制和无功-电压下垂控制的影响,将式(1)~(3)线性化并联立得到构网型柔直功率扰动量到虚拟

功角扰动量的传递函数:

$$\Delta \delta = K_P(s)(\Delta P_S - \Delta P_E) \quad (21)$$

$$\text{式中: } K_P(s) = \frac{2\omega_0(s+K_T)}{sC_{DC}(Js^2+Ds)}$$

线性化式(5)得到电压参考值扰动量与无功功率扰动量的关系,并联立式(21)可以得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V^{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_P(s) & \\ & K_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_S \\ \Delta Q^{\text{ref}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta P_E \\ \Delta Q_E \end{bmatrix} \quad (22)$$

至此,推得的式(19)与式(22)建立了构网型柔直并网系统的闭环动态模型,描述了在直流电压自同步控制下的构网型柔直功率-电压关系。

2 构网型柔直等效阻尼转矩分析

2.1 虚拟转子动态方程

构网型柔直采用直流电压自同步控制,模拟了同步发电机转子运动方程,可能影响交流系统中的同步机低频振荡特性。为此,本节借鉴同步机阻尼转矩法,在上述动态建模基础上进一步构建适用于构网型柔直的虚拟转子动态方程,便于后续构网型柔直对同步机低频振荡的影响分析。

首先,关注式(4)中的构网型柔直自同步控制方程,阻尼转矩关系为:

$$\begin{cases} J_{\text{eq}}s\Delta\omega = -\Delta T_D - \Delta T_{\text{PLL}} - \Delta T_E \\ \Delta\omega = s\Delta\delta \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\Delta T_D = D_{\text{eq}}\Delta\omega = (sD/\omega_0)\Delta\delta = f_D(s)\Delta\delta$ 表示构网型柔直直流电压自同步控制所提供的阻尼转矩; $\Delta T_E = \Delta P_E$ 和 $\Delta T_{\text{PLL}} = -D_{\text{eq}}\Delta\omega_g$ 分别为有关构网型柔直有功功率动态反馈与有关电网频率检测环节动态的等效转矩,具体表达式由后文给出。

考虑到构网型柔直的无功功率指令已由上级控制给定,即式(22)中 $\Delta Q^{\text{ref}} = 0$,则根据式(19)构网型柔直有功功率动态描述为:

$$\Delta P_E = [S_{11}(s) - \frac{K_Q S_{21}(s)S_{12}(s)}{1+K_Q S_{22}(s)}] \Delta \delta = \Delta T_E = f_E(s)\Delta \delta \quad (24)$$

式中: ΔT_E 为自同步控制下构网型柔直虚拟转子的等效电气转矩。

构网型柔直的直流电压自同步控制采用锁相环作为电网频率检测环节,对电压相角扰动也存

在反馈回路。具体地, 锁相环动态方程为:

$$\begin{cases} \Delta\omega_g = G_{PLL}(s)\Delta V_q \\ s\Delta\theta_{PLL} = \omega_0\Delta\omega_g \end{cases} \quad (25)$$

式中: $G_{PLL}(s)$ 为锁相环 PI 调节器的传递函数; θ_{PLL} 为锁相环检测到的电网相角。

结合式(25)与式(16)、(19)可得:

$$\Delta\omega_g = \left[\frac{M_1(s)}{M_3(s)} - \frac{M_2(s)K_Q S_{21}(s)}{M_3(s)[1 + K_Q S_{22}(s)]} \right] \Delta\delta: = \Delta\omega_g = f_\omega(s)\Delta\delta \quad (26)$$

式中:

$$\begin{cases} M_1(s) = \sin(\theta_0 - \theta_{PLL0})\text{Re}\{G_{21}(s)\} + \cos(\theta_0 - \theta_{PLL0})\text{Im}\{G_{21}(s)\} + m, \\ M_2(s) = \sin(\theta_0 - \theta_{PLL0})\text{Re}\{G_{22}(s)\} + \cos(\theta_0 - \theta_{PLL0})\text{Im}\{G_{21}(s)\}, \\ M_3(s) = 1/G_{PLL}(s) + m\omega_0/s, \\ m = V_{d0}\cos(\theta_0 - \theta_{PLL0}) - V_{q0}\sin(\theta_0 - \theta_{PLL0}) \end{cases} \quad (27)$$

结合式(23)、(26)可知, 与电网频率检测环节相关的等效转矩可写为:

$$\Delta T_{PLL} = -D_{eq}f_\omega(s)\Delta\delta: = f_{PLL}(s)\Delta\delta \quad (28)$$

2.2 等效阻尼转矩分析

阻尼转矩法广泛用于分析同步电网低频振荡问题^[24], 基于构网型柔直虚拟转子方程及其等效转矩表达式, 可以按经典阻尼转矩法分析构网型柔直并网系统的各个转矩分量, 便于将构网型柔直动态与同步机主导的交流系统联系起来, 如图 2 所示。

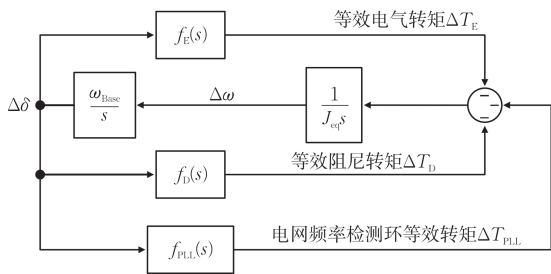


图 2 构网型柔直的等效阻尼转矩模型

Fig.2 Equivalent damping torque model of the grid-forming VSC-HVDC system

从图中可以看出, 基于虚拟转子视角, 构网型柔直的相角动态包含了 1 个前向通道与 3 个反馈回路。其中, 前向通道主要包含直流自同步控制

中的等效惯性环节, 等效惯性系数 J_{eq} 环节类比于同步机惯量, 主要影响振荡频率而并不直接贡献或消耗低频振荡的阻尼^[27], 并且其选取基于系统调频需求^[8], 一般相对固定, 故后文不讨论其影响; 反馈回路分别是并网功率反馈回路、阻尼反馈回路与电网频率检测反馈回路。其中, 并网功率反馈回路动态由式(24)中的 $f_E(s)$ 描述, 包含了无功功率-电压下垂控制、电压-电流内环控制与主电路部分的动态, 受扰后施加在虚拟转子上的等效电气转矩分量为 ΔT_E ; 阻尼反馈回路动态由式(23)中的 $f_D(s)$ 描述, 由直流电压自同步控制的等效阻尼系数决定, 也与构网型柔直的直流电容大小有关, 施加在虚拟转子上的等效阻尼转矩分量为 ΔT_D ; 电网频率检测反馈回路动态由式(28)中的 $f_{PLL}(s)$ 描述, 既与锁相环动态有关, 还与无功功率-电压下垂控制、电压-电流内环控制以及主电路等电气部分的动态相关, 施加在虚拟转子上的等效转矩分量为 ΔT_{PLL} 。

可见, 构网型柔直的等效阻尼转矩作用主要由 3 个等效转矩的合成转矩决定, 即在复频域有叠加关系 $\Delta T_\Sigma = \Delta T_D + \Delta T_{PLL} + \Delta T_E$ 。直观地看, 在表 1 所示的构网型柔直典型参数下, 图 3(a)~(c) 给出了各转矩对应反馈回路上传递函数在低频段的特性, 图 3(d) 给出了 3 个等效转矩与合成转矩的矢量关系。需要指出的是, 上述等效转矩由相应的频域传递函数决定, 不同频率点处对应的等效转矩的大小也是变化的, 本文主要关注低频段特性(0.2~2.5 Hz)。

表 1 构网型柔直参数

Table 1 Parameters of the grid-forming VSC-HVDC system

参数	数值
换相电抗器 $L_{ac}/p.u.$	0.05
滤波电容 $C_f/p.u.$	0.05
滤波电阻 $R_f/p.u.$	0.02
电流内环 PI 参数	$K_{PI}=0.3, K_{II}=10$
电压外环 PI 参数	$K_{PV}=4, K_{IV}=30$
惯量系数 J	105
阻尼系数 D	330
等效惯性系数 J_{eq}	6.3
等效阻尼系数 D_{eq}	20
直流电压跟踪系数 K_T	2
电网频率跟踪环节带宽 $\omega_{PLL}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	10
无功下垂系数 K_Q	2

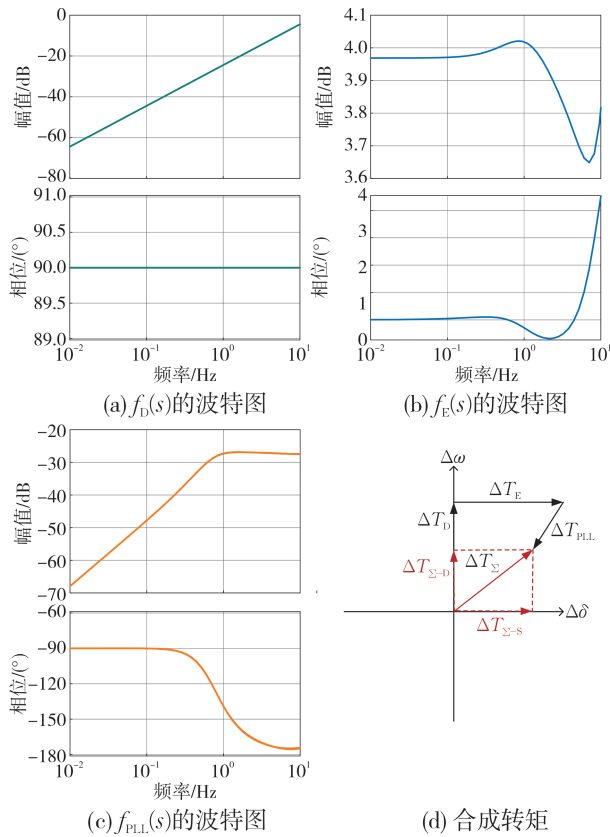


图3 等效转矩分量示意图

Fig.3 Illustration of equivalent torque components

根据阻尼转矩法, 3个等效转矩合成后的转矩 ΔT_{Σ} 可以分解为一个阻尼转矩 $\Delta T_{\Sigma-d}$ 以及一个同步转矩 $\Delta T_{\Sigma-s}$ 时, 判定系统稳定, 且阻尼转矩分量越大, 低频振荡模式的阻尼也越大; 而当系统合成转矩分解得到一个负的阻尼转矩时, 意味着阻尼不足, 判定低频振荡失稳^[26-29]。因此, 由图3可知, 在低频段上等等效阻尼转矩矢量 ΔT_D 与 $\Delta\omega$ 同相位, 具有提供阻尼转矩的作用, 等效电气转矩 ΔT_E 与 $\Delta\delta$ 几乎同相位, 而 ΔT_{PLL} 与 $\Delta\omega$ 接近反向, 具有抵消阻尼转矩的作用, 可能具有恶化构网型柔直所接入交流系统低频振荡模式的影响。

3 等效阻尼转矩的影响参数分析

3.1 直流电压自同步控制相关参数的影响

这一节主要分析直流电压自同步控制参数对上述构网型柔直各等效阻尼转矩分量的影响, 进而反映构网型柔直对系统低频振荡模式的影响。根据2.1节中各转矩对应传递函数的解析表达式, 本节主要关注自同步控制阻尼系数变化的影响。

图4分别给出了采用不同阻尼系数 D 时 $f_E(s)$ 、 $f_D(s)$ 与 $f_{PLL}(s)$ 的幅频-相频变化曲线以及相应的各等效转矩分量的变化。由图可知, 随着构网型柔直阻尼系数 D 的增大, $f_E(s)$ 基本不变, 对应等效电气转矩分量不变; $f_D(s)$ 低频段的幅值增大, 对应等效阻尼转矩分量增加, 意味着可以抑制低频振荡模式, 增加阻尼比; 而 $f_{PLL}(s)$ 低频段的幅值增大, 对应电网频率检测环节施加在虚拟转子上的负等效转矩分量也增加, 使得增大阻尼系数 D 对合成转矩分量的提升并不明显, 意味着此时构网型柔直接入交流系统并不能显著提高交流系统低频振荡模式的阻尼比。

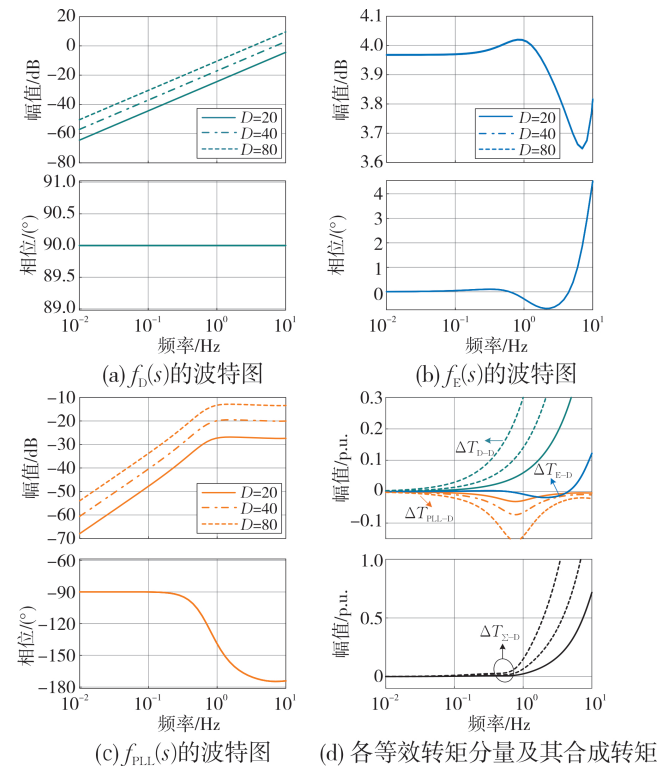


图4 自同步控制参数对等效阻尼转矩的影响

Fig.4 Effect of self-synchronizing control parameters on equivalent damping torque

3.2 电网频率检测环节参数的影响

根据2.2节分析, 电网频率检测环节可能引入负阻尼效应, 故本节主要关注电网频率检测环节参数对构网型柔直各等效阻尼转矩分量的影响, 进而反映该参数变化对系统低频振荡模式的影响。

图5给出了不同电网频率检测环节锁相环带宽下 $f_E(s)$ 、 $f_D(s)$ 与 $f_{PLL}(s)$ 的幅频-相频变化曲线以

及相应的各等效转矩分量的变化。由图可知, 随着电网频率检测环节锁相环带宽 ω_{BW} 的增大, $f_E(s)$ 与 $f_D(s)$ 基本不变, 对应等效电气转矩分量与阻尼转矩分量基本不变; 而 $f_{PLL}(s)$ 低频段的幅值增大, 对应电网频率检测环节施加在虚拟转子上的负等效转矩分量也增加, 导致合成转矩的阻尼分量减小。因此高锁相环带宽可能加剧电网频率检测环节与其他控制环路的耦合, 放大负阻尼效应, 进而意味着此时构网型柔直接入交流系统会削弱交流系统低频振荡模式的阻尼比。

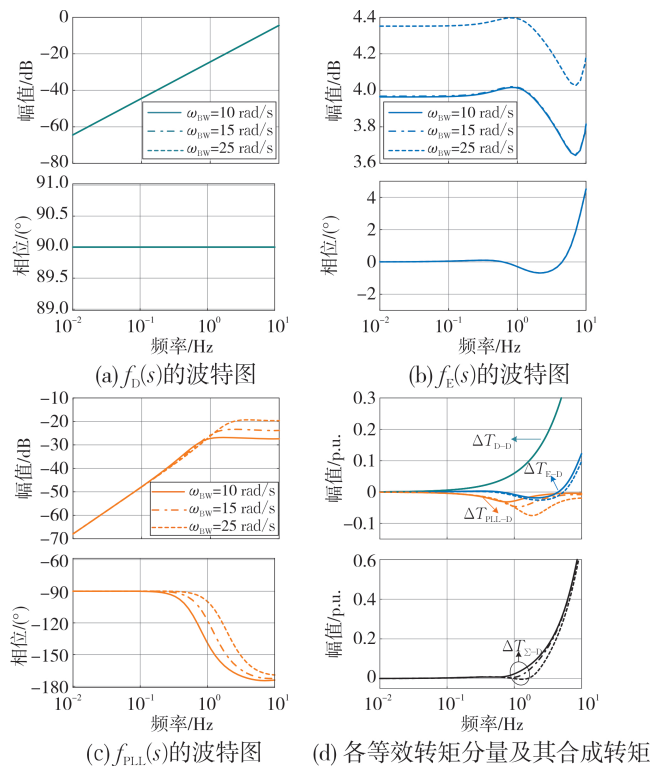


图 5 电网频率检测环节参数对等效阻尼转矩的影响
Fig.5 Effect of grid frequency detection loop parameters on equivalent damping torque

3.3 电压控制环参数的影响

交流电压控制是构网型柔直实现主动电压支撑能力的关键环节, 其性能与构网型柔直多个控制环路密切相关, 故本节主要关注电压控制环节参数对构网型柔直各等效阻尼转矩分量的影响, 进而反映该参数变化对系统低频振荡模式的影响。

图 6、图 7 分别给出了不同电压控制环增益系数与积分系数下 $f_E(s)$ 、 $f_D(s)$ 与 $f_{PLL}(s)$ 的幅频-相频变化曲线以及相应的各等效转矩分量的变化。

由图可知, 随着电压控制环增益系数 K_{PV} 和积分系数 K_{IV} 的增大, $f_D(s)$ 与 $f_{PLL}(s)$ 基本不变, 对应等效阻尼转矩分量基本不变; $f_E(s)$ 低频段的幅值与相位均有所增加(并不严格保持与 $\Delta\delta$ 同相), 投影到合成转矩上的阻尼转矩分量增加, 因此增大电压控制环增益系数与积分系数都具有间接削弱负阻尼效应的作用, 提高了扰动下电压控制的响应特性, 进而对交流系统低频振荡模式的阻尼比有提升效果。

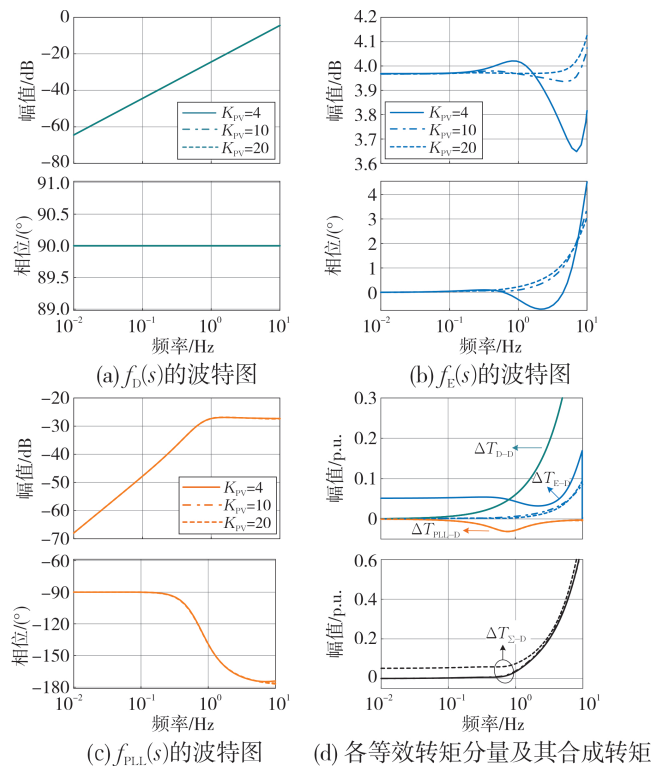


图 6 电压控制环比例参数对等效阻尼转矩的影响
Fig.6 Impact of the voltage control loop's proportional gain on the equivalent damping torque

4 仿真实验

为了验证上述构网型柔直的等效阻尼转矩分析以及其对交流系统低频振荡模式的影响, 本章将基于含构网型柔直的两区四机交流系统采用特征值分析与时域仿真方法验证。该系统连接拓扑如图 8 所示, 构网型柔直参数见表 1, 交流系统参数与文献[15]一致。

4.1 特征值分析验证

图 9(a) 给出了系统低频振荡模式随构网型柔直同步控制阻尼系数 D 变化的特征值轨迹。其

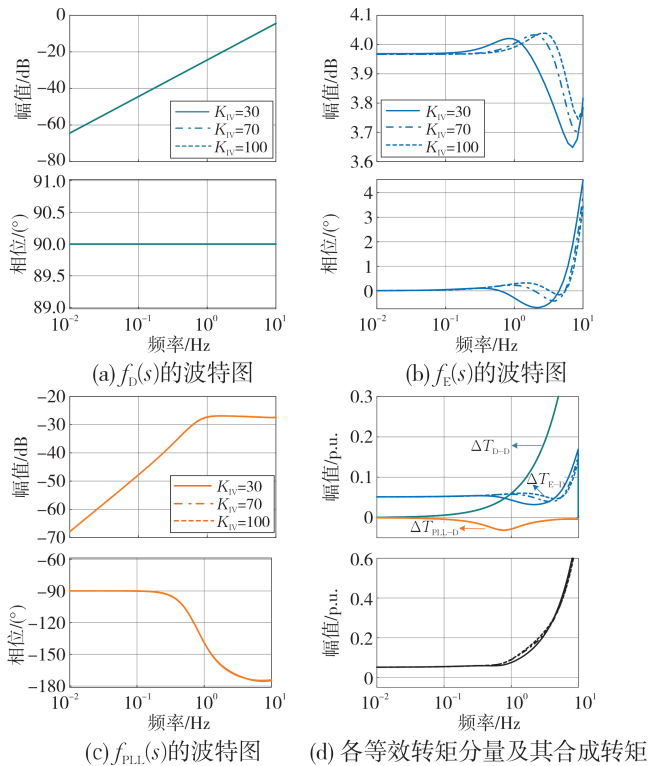


图7 电压控制环积分参数对等效阻尼转矩的影响
Fig.7 Impact of voltage control loop's integral gain on equivalent damping torque

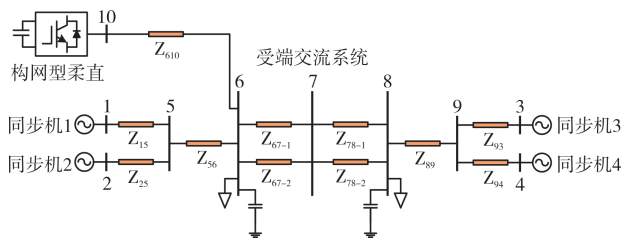


图8 含构网型柔性直流的受端交流系统
Fig.8 Receiving-end AC system with grid-forming VSC-HVDC system

中,当阻尼系数 D 从20变化到50时,低频振荡主导模式(即图9中模式1)的阻尼比有所提高,但继续将 D 从50增大到80时,主导模式的阻尼比几乎不变,这与阻尼转矩分析结果一致,即增大构网型柔直自同步控制阻尼系数在增大等效阻尼转矩的同时也放大电网频率检测回路的负阻尼效应,因此无法进一步改善交流系统低频振荡模式。

图9(b)给出了系统低频振荡模式随构网型柔直电网频率检测环节带宽 ω_{BW} 变化的特征值轨迹。其中,当锁相环带宽 ω_{BW} 从10 rad/s增加到25 rad/s时,低频振荡主导模式的阻尼比显著下降,可能

穿越虚轴失稳是由于增加了电网频率检测回路的负阻尼效应,与阻尼转矩分析结果一致。

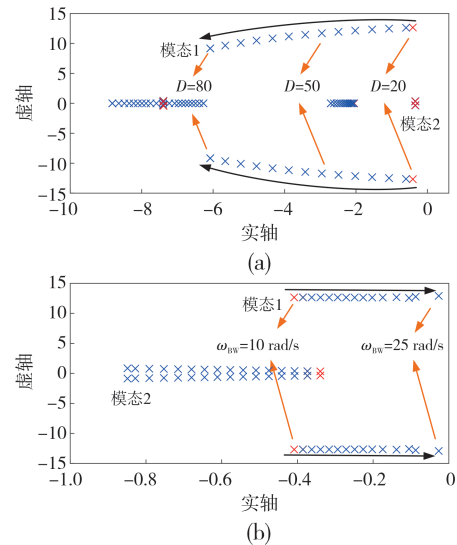


图9 不同自同步控制参数下低频振荡模式的移动轨迹
Fig.9 Trajectories of low-frequency oscillation modes under different self-synchronizing control parameters

图10(a)与(b)分别给出了系统低频振荡模式随构网型柔直电压控制增益系数 K_{PV} 与积分系数 K_{IV} 变化的特征值轨迹。其中,当交流电压控制增益 K_{PV} 从4增加到20与积分系数从30增加到100时,低频振荡主导模式的阻尼比有所提高,这是由于增加了等效电气转矩分量,使合成转矩的阻尼转矩分量增加,与阻尼转矩分析结果一致。

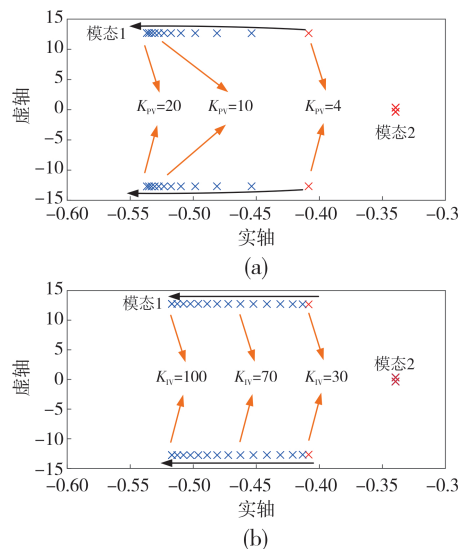


图10 不同电压控制参数下低频振荡模式的移动轨迹
Fig.10 Trajectories of low-frequency oscillation modes under different voltage control parameters

4.2 时域仿真验证

在MATLAB/Simulink中搭建如图8所示的含构网型柔直的两区四机交流系统, 验证上述构网型柔直的等效阻尼转矩分析以及其对交流系统低频振荡模式的影响。图11、图12分别给出了构网型柔直自同步控制参数与电压控制参数变化下的交流系统两区域联络线有功功率的时域仿真波形。

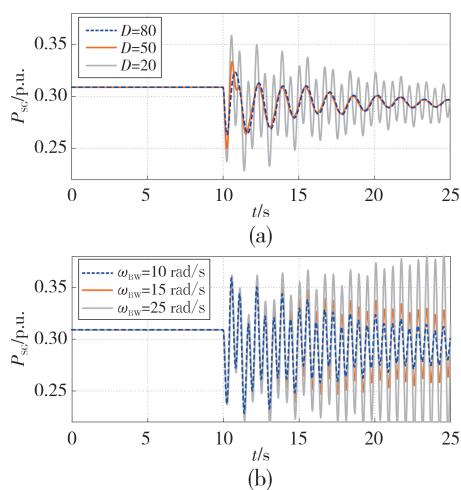


图11 不同自同步控制参数下系统低频振荡时域波形
Fig.11 Time-domain waveforms of system's low-frequency oscillations under different self-synchronizing control parameters

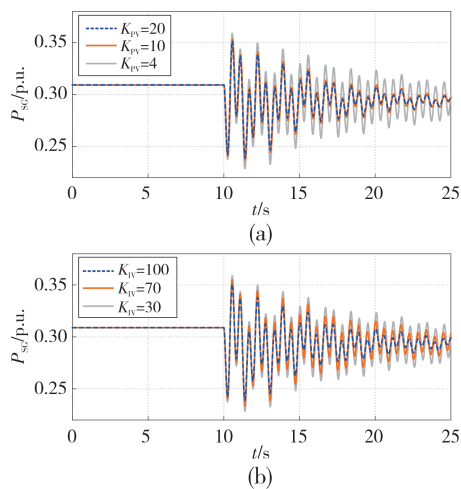


图12 不同电压控制参数下系统低频振荡时域波形
Fig.12 Time-domain waveforms of system's low-frequency oscillations under different voltage control parameters

具体地, 由图11(a)可以看出, 当构网型柔直的自同步控制阻尼系数从20变化到50时低频振荡得到了一定的抑制, 从50增大到80时有功时域响

应曲线却几乎不变, 这与前述的阻尼转矩分析以及特征值分析结果一致; 由图11(b)可以看出, 构网型柔直电网频率检测环节带宽为25 rad/s时可能加剧低频振荡失稳风险, 观测到系统出现2.01 Hz附近的振荡发散, 而减小到10 rad/s后, 系统低频振荡得到抑制, 这与前述的阻尼转矩分析以及根轨迹分析结果一致。由图12可以看出, 增大构网型柔直交流电压控制增益系数与积分系数可使得系统低频振荡的阻尼比略有提高, 这与前述的阻尼转矩分析以及根轨迹分析结果一致, 说明了合理的控制参数下构网型柔直可以避免加剧交流系统的低频振荡。

5 结语

本文聚焦构网型柔直接入受端交流系统的场景, 建立了构网型柔直动态模型, 采用等效阻尼转矩法分析了构网型柔直对系统低频振荡模式的影响。主要结论如下:

1) 构网型柔直可建立虚拟转子模型, 通过剖析等效阻尼转矩、电气转矩和引入的负阻尼转矩三者之间的相互作用关系, 说明了构网型柔直多控制参数对低频振荡阻尼的影响规律。

2) 提升构网型柔直自同步控制阻尼系数可通过增大阻尼转矩分量抑制所接入受端交流系统低频振荡模式, 但由于同时放大了电网频率检测的负阻尼效应而使得抑制效果有限。

3) 减小构网型柔直电网频率检测环节带宽与增加交流电压控制增益更有利于提升阻尼转矩分量, 对含构网型柔直的受端交流系统低频振荡具有改善作用。

本文主要研究了构网型柔直馈入受端交流系统的场景及其低频振荡影响因素, 为改善受端电网低频振荡提供了优化方向。探究构网型柔直与常规直流混合馈入受端交流系统的低频振荡特性将是下一步研究工作。

参考文献

- [1] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources

- [J].Strategic Study of CAE,2021,23(6):61-69.
- [2] 尹聪琦,谢小荣,刘辉,等.柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J].电网技术,2018,42(4):1117-1123.
YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J].Power System Technology, 2018, 42(4):1117-1123.
- [3] 吕思卓,舒展,宋新甫,等.柔性直流接入对弱受端电网恢复特性的影响及优化措施[J].电力工程技术,2020,39(1):31-37.
LYU Sizhuo, SHU Zhan, SONG Xinfu, et al. Influence of VSC-HVDC interconnection on recovery characteristics of weak receiving-end grid fault and optimization measure [J].Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 31-37.
- [4] D'ARCO S, BEERTEN J, SUUL J A. Classification and analysis of impact on small-signal dynamics and stability from expansion of VSC-HVDC systems to multi-terminal HVDC grids [C]//13th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2017). February 14-16, 2017, Manchester, UK. London: IET, 2017: 1-8.
- [5] 马彦琴,杨刚,李湛宇,等.计及系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性评估及灵敏度分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(6):98-107.
MA Yanqin, YANG Gang, LI Zhanyu, et al. Reliability assessment and sensitivity analysis of multiterminal VSCHVDC system considering system status [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 98-107.
- [6] KALCON G O, ADAM G P, ANAYA-LARA O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [7] 黄志光,曹路,李建华,等.混合多馈入直流作用下江苏受端电网安全稳定评估及改善[J].中国电力,2021,54(9):55-65.
HUANG Zhiguang, CAO Lu, LI Jianhua, et al. Evaluation and improvement of security and stability of Jiangsu receiving-end power grid with hybrid multi-infeed DC [J]. Electric Power, 2021, 54(9): 55-65.
- [8] 马鑫,李宏强,吕思卓,等.大规模构网型储能集中接入对短路电流的影响分析[J].浙江电力,2024,43(9):58-66.
MA Xin, LI Hongqiang, LYU Sizhuo, et al. Analysis of the impact of large-scale centralized integration of grid-forming energy storage system on short-circuit currents [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 58-66.
- [9] 伍双喜,过亮,刘洋,等.构网型风电机组的惯量阻尼特性分析[J].浙江电力,2024,43(7):56-63.
WU Shuangxi, GUO Liang, LIU Yang, et al. Analysis of inertia damping characteristics of GFM wind turbines [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 56-63.
- [10] 朱宝宇,王英,张子翔,等.构网型储能变流器技术研究综述与展望[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(3):1-12.
ZHU Baoyu, WANG Ying, ZHANG Zixiang, et al. Review and prospects on research of grid-forming energy storage converter technology [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 1-12.
- [11] 徐志洋,陈来军,苏小玲,等.基于改进滑模的高压直挂式构网型储能控制策略[J].电力电容器与无功补偿,2025,46(2):53-61.
XU Zhiyang, CHEN Laijun, SU Xiaoling, et al. Grid forming control strategy based on improved SMC for modular cascade high-voltage direct-mounted energy storage [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 53-61.
- [12] 饶宏,黄伟煌,郭铸,等.提升受端电网稳定性的主动支撑型柔性直流的形态、关键技术与展望[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6818-6831.
RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhu, et al. Grid-supporting VSC-HVDC for enhancing the stability of receiving end power grid: forms, key technologies, and prospects [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6818-6831.
- [13] 许诤翊,刘威,刘树,等.电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J].电网技术,2022,46(9):3586-3595.
XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [14] 孙孔明,李宽,冯忆文,等.面向MMC-HVDC换流站的构网型和跟网型控制无缝切换技术[J].山东电力技术,2025,52(7):44-53.
SUN Kongming, LI Kuan, FENG Yiwen, et al. Seamless switching method between grid-forming and grid-following control for MMC-HVDC converter stations [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(7): 44-53.
- [15] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. A virtual synchronous control for voltage-source converters utilizing dynamics of DC-link capacitor to realize self-synchronization [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1565-1577.
- [16] 詹长江,吴恒,王雄飞,等.构网型变流器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2339-2359.
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6):

- 2339-2359.
- [17] HUANG L B, XIN H H, WANG Z. Damping low-frequency oscillations through VSC-HVdc stations operated as virtual synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6):5803-5818.
- [18] 马为民,李明,薛英林,等.大容量电压源型逆变器在新型电力系统构建中的关键技术和创新展望[J].电力建设, 2025, 46(10):1-11.
- MA Weimin, LI Ming, XUE Yinglin, et al. Key technologies and innovation prospects of large-capacity voltage-sourced inverter in the construction of new power systems [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10):1-11.
- [19] 马铨林,杨欢,屈子森,等.改善虚拟同步发电机阻尼特性的设计方法[J].电网技术, 2021, 45(1):269-275.
- MA Yilin, YANG Huan, QU Zisen, et al. Design method for improving damping characteristics of virtual synchronous generator [J]. Power System Technology, 2021, 45(1):269-275.
- [20] 王光宇,付立军,胡祺,等.计及电压环影响的虚拟同步发电机低频振荡阻尼分析与控制[J].电力系统自动化, 2022, 46(14):177-184.
- WANG Guangyu, FU Lijun, HU Qi, et al. Analysis and control of low-frequency oscillation damping of virtual synchronous generator considering influence of voltage loop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14):177-184.
- [21] EBRAHIMI M, ALI KHAJEHODDIN S, KARIMIGHARTEMANI M. An improved damping method for virtual synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3):1491-1500.
- [22] ZHAO F Z, WANG X F, ZHU T H. Power dynamic decoupling control of grid-forming converter in stiff grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8):9073-9088.
- [23] 刘延龙,陈晓光,姚爽爽,等.基于构网型SVG控制优化的双馈风场高频谐振抑制分析[J].电力建设, 2024, 45(11):125-136.
- LIU Yanlong, CHEN Xiaoguang, YAO Shuangshuang, et al. Analysis of high-frequency resonance suppression in doubly-fed wind farms based on grid-forming SVG control optimization [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11):125-136.
- [24] 薛翼程,张哲任,徐政,等.构网型变流器对交流系统低频振荡的影响分析与阻尼控制[J].电力系统自动化, 2023, 47(16):103-113.
- XUE Yicheng, ZHANG Zheren, XU Zheng, et al. Impact analysis and damping control of grid-forming converter for low-frequency oscillation of AC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16):103-113.
- [25] HARNEFORS L. Modeling of three-phase dynamic systems using complex transfer functions and transfer matrices [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4):2239-2248.
- [26] KUNDUR P. Power System Stability and Control [M]. New York; Tokyo: McGraw-Hill, 1994.
- [27] ROSSO R, WANG X F, LISERRE M, et al. Grid-forming converters: control approaches, grid-synchronization, and future trends: a review [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2:93-109.
- [28] WANG W Y, JIANG L, CAO Y J, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low frequency oscillation damping [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6):4609-4621.
- [29] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [30] 胡家兵,袁小明,程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18):5457-5467.
- HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18):5457-5467.

收稿日期: 2025-05-17; 修回日期: 2025-09-26

作者简介:

王龙飞(1990), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。

马富艺龙(1996), 男, 工学博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。(通信作者)

(本文编辑: 童 凯)