DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.242 **中图分类号**：TM712 **文献标志码**：A

水-风可再生能源经LCC-HVDC送出系统的次/超同步振荡分析及抑制策略研究

凌子玥[1]，米文超[1,2]，马庭豪[1]，夏建华[2]，罗 腾[2]，
杜 雄[1](中国电源学会高级会员)
(1.输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学)，重庆 400044；2.中国长江电力股份有限公司溪洛渡电厂，昭通 657300)

摘要：随着“双碳”目标的推进，许多现有水电站规划将周边一定范围内的风电就近接入，建设水-风可再生清洁能源基地，并利用现有的水电通道将电能送出。届时随着风电装机容量逐渐增加，系统中可能存在次/超同步振荡问题。为保障电力系统的安全稳定运行，构建了水-风可再生能源经LCC-HVDC送出系统的典型运行场景。基于阻抗法探究了导致系统出现次/超同步振荡的关键因素，提出了一种基于虚拟导纳的次/超同步振荡抑制策略。该方法通过减小LCC系统在振荡频率处的端口等效阻抗，降低了其与水-风可再生能源发电系统的交互影响，从而实现了振荡抑制，并基于MATLAB/Simulink仿真验证了该控制策略的有效性。

关键词：水-风可再生能源；LCC-HVDC；振荡抑制；阻抗建模

Sub-/super-synchronous Oscillation Analysis and Suppression Strategy for Hydro-wind Renewable Energy Transmission via LCC-HVDC Systems

LING Ziyue[1], MI Wenchao[1,2], MA Tinghao[1], XIA Jianhua[2], LUO Teng[2], DU Xiong[1], *Senior Member*, *CPSS*
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Xiluodu Power Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Zhaotong 657300, China)

Abstract: With the advancement of dual-carbon goals, many of the existing hydropower stations plan to integrate nearby wind power within a certain range, form hydro-wind renewable clean energy bases and use the existing hydropower transmission lines for power delivery. As the wind power capacity increases gradually, a power system may encounter sub-/super-synchronous oscillation issues. To ensure the safe and stable operation of the system, a typical operation scenario for a system with hydro-wind renewable energy delivered via LCC-HVDC is constructed. The key factors causing sub-/super-synchronous oscillations are examined using the impedance method, and a virtual admittance-based suppression strategy for sub-/super-synchronous oscillations is put forward. This method reduces the interaction between LCC system and the hydro-wind renewable energy generation system by lowering the equivalent impedance of LCC system at the oscillation frequency, thus suppressing oscillations. In addition, the effectiveness of the proposed control strategy is verified through MATLAB/Simulink simulations.

收稿日期：2025-10-30；**修回日期**：2025-12-03；**录用日期**：2025-12-12；**网络首发日期**：2026-01-22
基金项目：三峡金沙江川云水电开发有限公司科研资助项目(Z412302032)
This work is supported by Three Gorges Jinsha River Chuan-Yun Hydropower Development Co., Ltd. under the grant Z412302032

Keywords: Hydro-wind renewable energy; LCC-HVDC; oscillation suppression; impedance modeling

为响应“双碳”目标，四川将多元化开发省内的可再生清洁能源，在省西部金沙江、雅砻江及大渡河流域内建设水电-新能源清洁基地，利用已有

的水电通道将电能送出，充分挖掘水电机组调频能力[1]，提升电力系统对新能源的消纳水平[2-3]，实现可再生清洁能源的优化利用[4]，有效推动西南地区绿色能源的基地化、规模化开发[5]。随着风储系统的大规模接入，四川以传统水电为主的电力系统形态面临更加复杂的局面，如电网短路比进一步减小、电力电子装备与电网交互日益增多[6]，大大增加了宽频振荡风险。

阻抗分析法是目前分析电力电子系统宽频振荡的常用方法之一[7]，通过对发电单元的端口特性进行精细化建模，可以直观分析系统在不同频段的稳定裕度或振荡风险。现有研究针对新能源发电单元[8-9,13]及直流系统[7,14]的阻抗建模已较为成熟，而由于传统水电机组在电力系统中鲜有宽频振荡事故，因此目前对于水电机组的研究主要聚焦于由机械结构引起的低频或超低频振荡[10]、频率响应及功率支撑等方面[11]。现有研究已证实，随着四川风电的大规模接入，传统水电系统的稳定性进一步恶化[12]，因此针对西南地区形成的水电-新能源外送系统，有必要深入探究其阻抗特性及振荡风险。针对这一实际工程场景，已有诸多学者先后针对直驱风机[13]、LCC-HVDC[14]及抽水蓄能[15]等关键对象进行了阻抗模型的构建与振荡机理的研究分析。其中文献[13]研究了频率耦合现象对直驱风机的影响规律，并针对风速变化导致运行点漂移的风电系统提出双变量导纳模型；文献[14]研究了频率耦合现象对 LCC-HVDC 送端系统的影响，探究了其在弱电网下的振荡风险；文献[15]建立了包含水轮机、发电机、励磁调速系统及背靠背变流器的全功率变速抽水蓄能机组的阻抗模型，并对水轮机发电侧进行了详细的数学建模，为水-风可再生清洁能源经 LCC-HVDC 送出系统的振荡风险及抑制策略研究提供了详细的理论模型。

针对电力电子系统的宽频振荡抑制策略研究，现有文献主要从 2 个方面展开：①软件层面[16-21]：通过优化电力电子装备的控制参数或控制结构，从而重构并网系统在特定频段的阻尼特性，达到振荡抑制的目的，其优势在于成本较低，无需投入额外的硬件装置，且几乎无电能损耗，控制参数灵活可控；②硬件层面[22-24]：在并网点或电力系统关键节点引入硬件阻尼装置，从而达到重塑阻抗、优化负阻尼的目的，其通常适用于一些已经建成的、较大的新能源场站，难以对各个发电单元进行控制层面的优化或修改。

综上，现有研究多聚焦于新能源或是直流输电系统的振荡分析及抑制策略研究，针对水电机组与直驱风机经 LCC-HVDC 送出系统的振荡分析及抑制策略还鲜有涉及。因此，本文以工程需求为导向，以水-风可再生清洁能源经 LCC-HVDC 送出系统为研究对象，基于阻抗视角研究水电机组、直驱风机、LCC-HVDC 三者间的交互作用、振荡机理及振荡抑制策略，相关研究对未来电力能源清洁化发展有着重要意义。

1　水-风基地经 LCC-HVDC 送出系统的阻抗模型建立

水-风能源经 LCC-HVDC 送出系统结构如图 1 所示，图中：Z_{PMSG} 为直驱风机机组阻抗；Z_{HTG} 为水电机组阻抗；Z_g 为送端电网阻抗；u_g 为送端电网电压；Z_{facr} 为送端交流滤波阻抗；Z_{LCC} 为送端阻抗；i_{dc} 为直流输电电流；Z_x 为直流传输线路阻抗；Z_{ldc} 为直流线路电阻；S_{abci} 为受端逆变器开关管触发脉冲；Z_{fcr} 为送端直流滤波阻抗；Z_{fci} 为受端直流滤波阻抗；Z_{faci} 为受端交流滤波阻抗；Z_{gi} 为受端电网阻抗；u_{gi} 为受端电网电压。水电机组和直驱风场所产

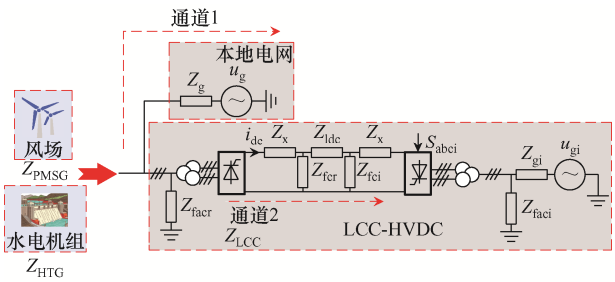


图 1　水-风能源经 LCC-HVDC 送出系统结构

Fig. 1 Structure of system with hydro-wind energy delivered via LCC-HVDC

生的电力能源一部分通过通道 1 送入本地电网，另一部分通过通道 2 经 LCC-HVDC 送出。

对于该系统的振荡分析，需建立水轮发电机组、直驱风机及 LCC-HVDC 送端系统的阻抗模型。

1.1 水-风联合系统的阻抗模型

水轮发电机组由调速器、水轮机、同步电机 3 个部分组成。文献[15]在建立抽水蓄能机组的阻抗模型时，对前级水轮机部分进行了精细化建模，其中水电机组中调速器小信号线性化模型可表示为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{K_\mathrm{p}}{K_\mathrm{i}}\Delta\omega-\dfrac{K_\mathrm{p}R_\mathrm{p}}{K_\mathrm{i}}\Delta P_\mathrm{e}\\ \Delta P_\mathrm{e}=U_{d0}\Delta i_d+I_{d0}\Delta u_d+U_{q0}\Delta i_q+I_{q0}\Delta u_q\\ \dfrac{\mathrm{d}\mu}{\mathrm{d}t}=\dfrac{K_\mathrm{a}}{T_\mathrm{a}}\Delta\eta-\dfrac{1}{T_\mathrm{a}}\Delta\mu\end{cases}\tag{1}$$

式中：η 为中间变量；K_p 和 K_i 为比例积分 PI (proportional integral)控制器的控制参数；ω 为电角速度；R_p 为功率调节下垂系数；P_e 为电磁功率；U_{d0}、U_{q0}、I_{d0}、I_{q0} 分别为同步电机 d、q 轴的电压、电流稳态量；u_d、u_q、i_d、i_q 分别为同步电机 d、q 轴电压、电流；μ 为导叶开度；K_a 为液压系统的增益；T_a 为液压系统的惯性时间常数。

水轮机机械部分的小信号线性化模型可表示为

$$\begin{cases}\Delta H=\dfrac{2\sqrt{H_0}}{K_\mathrm{TG}\mu_0}\Delta F-\dfrac{2H_0}{\mu_0}\Delta\mu\\ \dfrac{\mathrm{d}\Delta F}{\mathrm{d}t}=-\dfrac{2\sqrt{H_0}}{T_\mathrm{W}K_\mathrm{TG}\mu_0}\Delta F+\dfrac{2H_0}{T_\mathrm{W}\mu_0}\Delta\mu\\ \Delta P_\mathrm{m}=\left(\dfrac{2F_0\sqrt{H_0}}{T_\mathrm{W}\mu_0}+H_0\right)\Delta F-\dfrac{2H_0F_0}{\mu_0}\Delta\mu\end{cases}\tag{2}$$

式中：H 为水轮机的净水头；H_0 为净水头初始稳态量；K_TG 为放大系数；μ_0 为导叶开度初始稳态量；F 为水流速；T_W 为水锤时间效应常数；P_m 为水轮机输出机械功率；F_0 为水流速初始稳态值。

水电机组中的同步发电机小信号线性化模型可表示为

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\psi_d\\ \psi_\mathrm{f}\\ \psi_\mathrm{D}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_d & x_{ad} & x_{ad}\\ x_{ad} & x_\mathrm{f} & x_{ad}\\ x_{ad} & x_{ad} & x_\mathrm{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-i_d\\ i_\mathrm{f}\\ i_\mathrm{D}\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}\psi_q\\ \psi_\mathrm{g}\\ \psi_\mathrm{Q}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_q & x_{aq} & x_{aq}\\ x_{aq} & x_\mathrm{g} & x_{aq}\\ x_{aq} & x_{aq} & x_\mathrm{Q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-i_q\\ i_\mathrm{g}\\ i_\mathrm{Q}\end{bmatrix}\end{cases}\tag{3}$$

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}}{\omega_0\mathrm{d}t}\begin{bmatrix}\Delta\psi_d\\ \Delta\psi_q\\ \Delta\psi_\mathrm{f}\\ \Delta\psi_\mathrm{D}\\ \Delta\psi_\mathrm{g}\\ \Delta\psi_\mathrm{Q}\end{bmatrix}=&\begin{bmatrix}0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\psi_d\\ \Delta\psi_q\\ \Delta\psi_\mathrm{f}\\ \Delta\psi_\mathrm{D}\\ \Delta\psi_\mathrm{g}\\ \Delta\psi_\mathrm{Q}\end{bmatrix}+\\ &\begin{bmatrix}R_\mathrm{a} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & R_\mathrm{a} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & R_\mathrm{f} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & R_\mathrm{D} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_\mathrm{g} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_\mathrm{Q}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_d\\ \Delta i_q\\ \Delta i_\mathrm{f}\\ \Delta i_\mathrm{D}\\ \Delta i_\mathrm{g}\\ \Delta i_\mathrm{Q}\end{bmatrix}-\\ &\begin{bmatrix}\Delta\psi_{q0}\\ -\Delta\psi_{d0}\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\Delta\omega+\begin{bmatrix}\Delta u_d\\ \Delta u_q\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\end{aligned}\tag{4}$$

式中：ψ_d、ψ_q、ψ_f、ψ_D、ψ_g、ψ_Q 为绕组磁链；x_d、x_q 分别为 d、q 轴的同步电抗；x_{ad}、x_{aq} 分别为 d、q 轴的电枢反应电抗；x_f 为励磁绕组电抗；x_D、x_g、x_Q 为阻尼绕组电抗；i_f 为励磁电流；i_D、i_g、i_Q 为阻尼绕组电流；ω_0 为基频角速度；R_a、R_f 分别为定子和励磁绕组的电阻；R_D、R_g、R_Q 为同步电机的阻尼绕组电阻；ψ_{d0}、ψ_{q0} 分别为 d、q 轴绕组磁链稳态量。

结合式(1)~式(4)所示的调速器、水轮机、同步电机的小信号线性化模型，可得水电机组全状态十阶状态空间模型为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}=[\Delta i_d\ \ \Delta i_q\ \ \Delta i_\mathrm{f}\ \ \Delta i_\mathrm{D}\ \ \Delta i_\mathrm{g}\ \ \Delta i_\mathrm{Q}\ \ \Delta F\ \ \Delta\alpha\ \ \Delta\mu\ \ \Delta\omega_\mathrm{t}]^\mathrm{T}\\ \boldsymbol{u}=[\Delta u_d\ \ \Delta u_q]^\mathrm{T}\\ \boldsymbol{y}=[\Delta i_d\ \ \Delta i_q]^\mathrm{T}\end{cases}\tag{6}$$

式中：ω_1 为实际角频率；$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 为状态空间方程系数矩阵。

根据式(5)中的小信号模型，可以得到水轮发电机系统在 dq 坐标系下的导纳模型为

$$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{HG},dq}=\begin{bmatrix}Y_{dd} & Y_{dq}\\ Y_{qd} & Y_{qq}\end{bmatrix}=[\boldsymbol{C}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}] \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

在得到水电机组的 dq 导纳模型后，代入文献[25]所提的自导纳/伴随导纳与 dq 导纳间的量化解析式，可得水电机组的导纳矩阵表达式为

$$\begin{cases}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{HTG}}=\begin{bmatrix}1 & 1\\ -\mathrm{j} & \mathrm{j}\end{bmatrix}^{-1}\\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{HTG},dq}\begin{bmatrix}1 & 1\\ -\mathrm{j} & \mathrm{j}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Y_{\mathrm{HTG,sa}} & Y_{\mathrm{HTG,aa}}\\ Y_{\mathrm{HTG,aa}} & Y_{\mathrm{HTG,sa}}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$Y_{\mathrm{HTG,sa}}$ 为水电机组自导纳；$Y_{\mathrm{HTG,aa}}$ 为水电机组伴随导纳。

对于直驱风机而言，文献[13]综合考虑了直驱风机机组的涡轮机、永磁同步电机、机侧整流器和网侧逆变器的数学模型，计及频率耦合现象，得到了直驱风机机组的自导纳 $Y_{\mathrm{PMSG,sa}}$ 和伴随导纳 $Y_{\mathrm{PMSG,aa}}$。

可再生清洁能源基地本质上就是多个发电子系统的并联，不同单元的自导纳、伴随导纳与电压扰动之间的等效拓扑如图 2 所示。图中：$I_{\mathrm{p}n}$ 为第 n 个集电子系统的扰动电流；$I^{*}_{\mathrm{p}n}$ 为耦合频率下的扰动电流；$Y_{\mathrm{sa},n}$ 为第 n 个集电子系统的自导纳；I_{p} 为并联多集电子系统总扰动电流；U_{p} 为扰动电压；ω_{p} 为扰动角频率；$Y_{\mathrm{aa},n}$ 为第 n 个集电子系统的伴随导纳。

根据图 2 所示拓扑，可得多集电子系统的自导纳和伴随导纳表达式分别为

$$\begin{cases}Y_{\mathrm{RE,sa}}=Y_{\mathrm{sa},1}+Y_{\mathrm{sa},2}+\cdots+Y_{\mathrm{sa},n}\\ Y_{\mathrm{RE,aa}}=Y_{\mathrm{aa},1}+Y_{\mathrm{aa},2}+\cdots+Y_{\mathrm{aa},n}\end{cases} \tag{9}$$

式中，$Y_{\mathrm{RE,sa}}$ 和 $Y_{\mathrm{RE,aa}}$ 分别为水-风联合系统的自导纳和伴随导纳。

当该联合系统接入电网时，会产生频率耦合现象，因此为了验证该阻抗模型的正确性，将该系统接入电网，其中并网点端口的等效电网阻抗为 Z_{s}。计及频率耦合效应的影响，系统导纳与电网阻抗间的电压激励和电流响应的关系如图 3 所示。

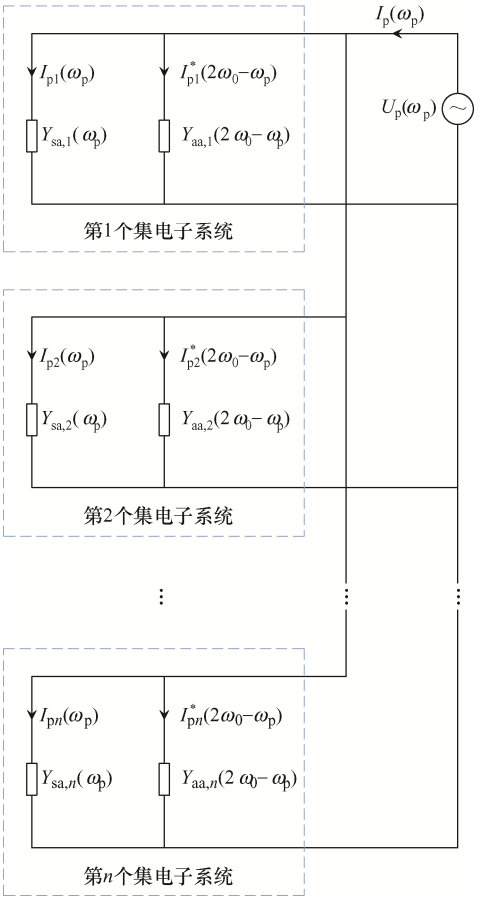


图 2　多集电子系统导纳拓扑示意

Fig. 2 Schematic of topology of admittance of multi-component electronic system

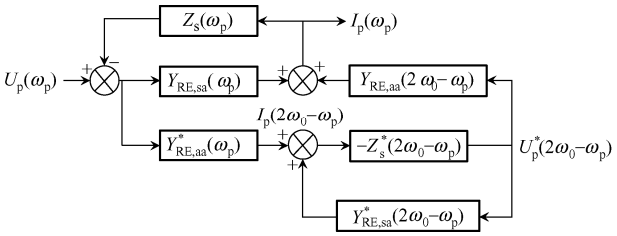


图 3　系统导纳与电压激励和电流响应之间的传递关系

Fig. 3 Transfer relationship between system admittance, voltage excitation and current response

根据图 3 所示的系统导纳与电网阻抗间的电压激励和电流响应的传递关系，可得水-风联合系统的等效阻抗为

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{RE,inv}}(\omega_{\mathrm{p}}) = Y_{\mathrm{RE,sa}}(\omega_{\mathrm{p}}) - \\ \quad \dfrac{Y^{*}_{\mathrm{RE,aa}}(2\omega_0-\omega_{\mathrm{p}})Y^{*}_{\mathrm{RE,aa}}(\omega_{\mathrm{p}})Z^{*}_{\mathrm{s}}(2\omega_0-\omega_{\mathrm{p}})}{1+Y^{*}_{\mathrm{RE,sa}}(2\omega_0-\omega_{\mathrm{p}})Z^{*}_{\mathrm{s}}(2\omega_0-\omega_{\mathrm{p}})} \\ Z_{\mathrm{RE,inv}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{1}{Y_{\mathrm{RE,inv}}(\omega_{\mathrm{p}})} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$Y_{\mathrm{RE,inv}}$ 为水-风联合系统的等效导纳；$Z_{\mathrm{RE,inv}}$ 为水-风联合系统的等效阻抗；*表示共轭。

本文研究采用西部某可再生能源场站中的相关工程参数，同步电机及水轮机部分参数分别见表 1 和表 2。

表 1 同步电机部分参数

Tab. 1 Part of parameters of synchronous generator

参数	数值
额定输出功率 P/MW	770
额定输出电压 U/kV	20
直轴同步电抗 X_d(p.u.)	1.022
交轴同步电抗 X_q(p.u.)	0.751
定子电阻 R_{a}(p.u.)	0.001 287
定子漏抗 X_{l}(p.u.)	0.145
励磁绕组电抗 X_{f}(p.u.)	1.085
阻尼绕组电抗 X_{D}(p.u.)	1.157
阻尼绕组电抗 X_{g}(p.u.)	0.730
阻尼绕组电抗 X_{Q}(p.u.)	0.730
励磁绕组电阻 R_{f}(p.u.)	0.000 289
阻尼绕组电阻 R_{D}(p.u.)	0.010 500
阻尼绕组电阻 R_{g}(p.u.)	0.006 830
阻尼绕组电阻 R_{Q}(p.u.)	0.006 830

表 2 水轮机部分参数

Tab. 2 Part of parameters of hydroturbine

参数	数值
水锤时间效应常数 T_{W}(p.u.)	1.1
伺服电机一阶增益 K_{a}(p.u.)	1.25
伺服电机时间常数 T_{a}(p.u.)	1
初始机械功率 P_0(p.u.)	1.001 34
比例增益 K_{p}(p.u.)	5
积分增益 K_{i}(p.u.)	1
导数增益 K_{d}(p.u.)	0
净水头初始稳态量 H_0(p.u.)	1.00
水流速 F_0(p.u.)	1.00
导叶开度 μ_0(p.u.)	0.966
功率调节系数 R_{p}(p.u.)	0.05
极对数 P(p.u.)	2
放大系数 K_{TG}(p.u.)	1.036
转动惯量 J(p.u.)	9.01

本文研究背景主要考虑在已建成的水电站周围就近接入风电，借助水电外送通道将可再生清洁能源进行本地消纳及经 LCC-HVDC 送出。因此，在建设初期考虑的直驱风机容量相较于水电机组容量更低，额定工况下设定有 1 台水轮机与 100 台直驱风机并联运行。阻抗扫描结果如图 4 所示。

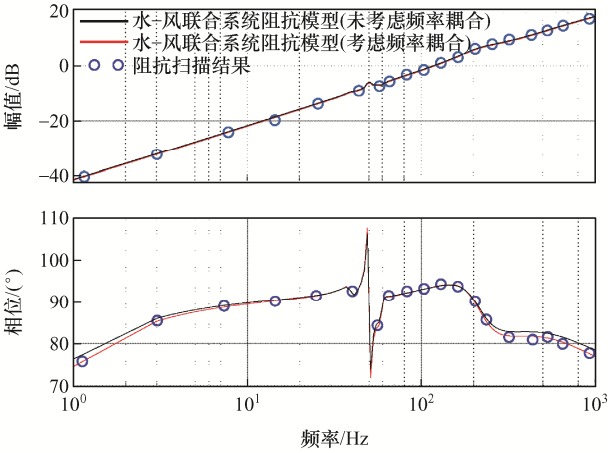


图 4 水-风联合系统阻抗扫描验证

Fig. 4 Impedance scan verification of hydro-wind combined system

由图 4 可见，频率扫描结果与式(10)的阻抗模型较为吻合，频率耦合现象对水-风联合系统的影响较小。这是因为电力系统中的频率耦合是发电单元控制结构不对称导致的，而对于水轮机，其机械结构较为对称，因此频率耦合现象不明显；且风机容量较小，水-风联合系统的阻抗特性主要由水轮机主导，故忽略频率耦合现象，所得到的阻抗模型仍有较高精度。因此，在后续讨论中，发电端导纳 Y_{RE} 可用联合系统自导纳近似代替，即

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{RE}}(\omega_{\mathrm{p}}) \approx Y_{\mathrm{RE,sa}}(\omega_{\mathrm{p}}) = Y_{\mathrm{HTG,sa}}(\omega_{\mathrm{p}}) + \\ \quad 100Y_{\mathrm{PMSG,sa}}(\omega_{\mathrm{p}}) \\ Z_{\mathrm{RE}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{1}{Y_{\mathrm{RE}}(\omega_{\mathrm{p}})} \end{cases} \tag{11}$$

式中，Z_{RE} 为取 100 台直驱风机和 1 台水轮机系统下的水-风联合系统自阻抗。

1.2 LCC-HVDC 送端系统的阻抗模型

图 1 所示的水-风可再生清洁能源送出系统中，LCC-HVDC 的控制结构如图 5 所示。图中：v_{gr}、

v_{gi} 分别为送端和受端网侧交流电压；u_{dc} 为直流输电系统电压；I_{dcref}、U_{dcref} 分别为直流电流、电压参考值；G_f 为滤波环节；H_p 为锁相环 PI 控制环节；H_c、H_v 分别为直流电流、电压 PI 控制环节；s 为复频率变量；α、β 分别为整流及逆变器的触发角；θ 为锁相环输出相角；S_{abcr} 为送端逆变器开关管触发脉冲。

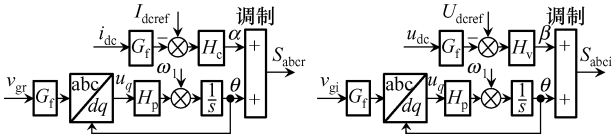


图 5　LCC-HVDC 控制结构

Fig. 5 LCC-HVDC control structure

其中送端整流侧采用定电流控制，受端逆变侧采用定电压控制。由于整流侧与逆变侧控制器结构高度对称，文献[14]以整流侧为例详细建立了 LCC-HVDC 系统的阻抗模型，得到了其自阻抗 $Z_{LCC,sa}$ 和伴随阻抗 $Z_{LCC,aa}$。

本文提出在建立直流输电系统的模型时，需计及频率耦合现象的影响，否则得到的阻抗模型误差较大。根据图 3 所示的传递关系，可得其等效导纳、阻抗的表达式分别为

$$\begin{cases} Y_{LCC,inv}(\omega_p)=Y_{LCC,sa}(\omega_p)- \\ \qquad \dfrac{Y^*_{LCC,aa}(2\omega_0-\omega_p)Y^*_{LCC,aa}(\omega_p)Z^*_s(2\omega_0-\omega_p)}{1+Y^*_{LCC,sa}(2\omega_0-\omega_p)Z^*_s(2\omega_0-\omega_p)} \\ Z_{LCC,inv}(\omega_p)=\dfrac{1}{Y_{LCC,inv}(\omega_p)} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$Y_{LCC,inv}$ 为 LCC 系统的等效导纳；$Y_{LCC,sa}$、$Y_{LCC,aa}$ 分别为 LCC 系统的自导纳、伴随导纳；$Z_{LCC,inv}$ 为 LCC 系统的等效阻抗。

本文中 LCC-HVDC 系统的参数[14]见表 3。

根据表 3 参数，在 MATLAB/Simulink 中对其进行频率扫描验证，扫频结果与阻抗模型的对比如图 6 所示。

由图 6 可见，忽略频率耦合现象后 LCC-HVDC 系统的阻抗模型产生明显误差，因此借助阻抗模型分析系统稳定性时，不可忽略频率耦合对 LCC 的影响。

表 3　LCC-HVDC 系统参数

Tab. 3 Parameters of LCC-HVDC system

参数	数值
送端交流电网电压 u_{gr}/kV	500
电网频率 f_1/Hz	50
直流额定电压 U_{dc}/kV	800
额定传输功率 P_L/MW	2 500
直流阻抗 $Z_{ldc}(s)=sL_l+R_l$(p.u.)	$0.01s+5$
变压器阻抗 $Z_t(s)=sL_t+R_t$(p.u.)	$0.005s+0.1$
直流电流环 PI 参数(p.u.)	$2.2+183.2/s$
直流电压环 PI 参数(p.u.)	$1+500/s$
锁相环 PI 参数(p.u.)	$1.91\times10^{-4}+3.6\times10^{-2}/s$
采样滤波器 $G_f(s)=1/(T_s s+1)$(p.u.)	$1/(0.001s+1)$

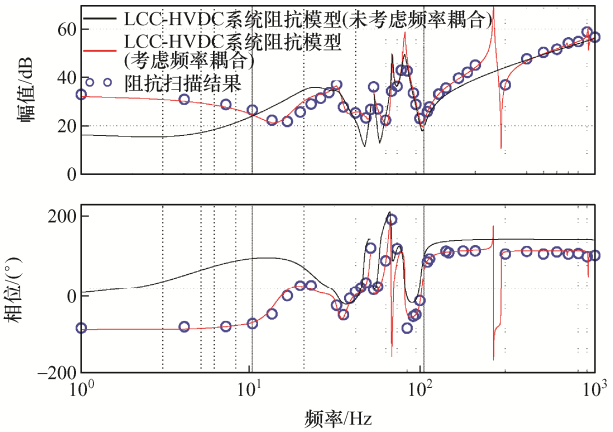


图 6　LCC-HVDC 系统阻抗扫描验证结果

Fig. 6 Impedance scan verification results of LCC-HVDC system

2　水风能源基地经 LCC 送出系统的次/超同步振荡分析

2.1　弱送端电网条件下的系统稳定性分析

以电网阻抗 $Z_g=0.08+0.12s$ 为例，分别做出发电端等效电网阻抗 $Z_s(Z_s=Z_{RE}+Z_g)$ 与送电端阻抗 Z_{LCC} 的伯德图，如图 7 所示。

由图 7 可见，Z_s 和考虑频率耦合的 Z_{LCC} 在中高频处(除 f_1 频段外)的相位基本一致，均在 90° 左右，因此系统几乎无中高频振荡风险。在次/超同步频段及 f_1 频段处，二者的相位差较大，若在幅值上产生交互，则易有失稳风险。相反，若不考虑 LCC 的频率耦合现象，则二者的阻抗曲线在中高频段相位基本一致，且次/超同步频段的相差更小，显

然具备更好的小信号稳定性。

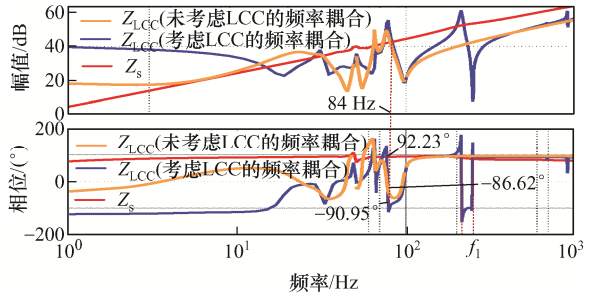


图 7 Z_s 和 Z_{LCC} 阻抗交互伯德图

Fig.7 Bode plot of impedance interaction between Z_s and Z_{LCC}

以图 7 中的幅值交点为例:若忽略 LCC-HVDC 系统的频率耦合效应,此时 Z_s 和 Z_{LCC} 虽然在 84 Hz 处存在交点，但是交点频率的相位差为 178.85°，根据奈奎斯特稳定性判据，此时系统应是稳定的；若考虑 LCC 的频率耦合效应，此时 Z_s 和 Z_{LCC} 的幅值仍在 84 Hz 处存在交点，且相位差为 183.18°，根据奈奎斯特稳定性判据及频率耦合现象，系统中应存在 84 Hz 和 16 Hz 的谐波振荡，系统是不稳定的。弱送端电网下的并网点电压和电流波形如图 8 所示，可以看出并网电流有明显的振荡。

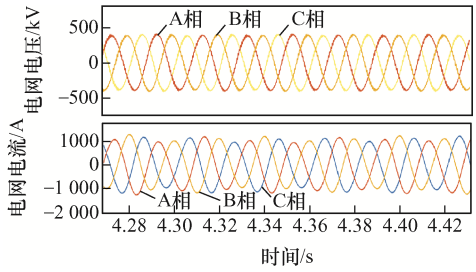


图 8 弱送端电网下的三相并网电压、电流波形

Fig. 8 Waveforms of three-phase voltage and current at grid-connected point under weak feed-in grid conditions

由上述分析可知,LCC 系统与等效电网的耦合作用，使得 LCC 系统输出阻抗在次/超同步频段与发电端阻抗间的相位差显著增大，进而增加了系统的失稳风险。由此也能看出 LCC 与 Z_s 的耦合作用是导致系统失稳的核心因素，需进一步分析不同电网强度对系统稳定性的影响规律。

2.2 送电端电网强度对 LCC 系统阻抗的影响规律

考虑到送端电网强度的差异对系统整体稳定性具有不可忽视的影响，本文选取电网阻抗基准值 Z_{g0}=0.01+0.01s，以此探究 Z_{g1}=Z_{g0}/10 及 Z_{g2}=10Z_{g0} 的电网阻抗对 LCC 系统耦合特性的影响规律。图 9 展示了电网阻抗分别为 Z_{g0}、Z_{g1}、Z_{g2} 时，LCC-HVDC 送端系统计及其与发电端频率耦合特性的阻抗曲线。由图 9 可见，随着送端电网强度的减弱，系统的负阻尼频段变宽，且在 f_1 频段处会有一段从 90° 以上到−90° 以下的过渡，其易使发电端与送电端阻抗产生较大的相位差，从而诱发系统振荡。

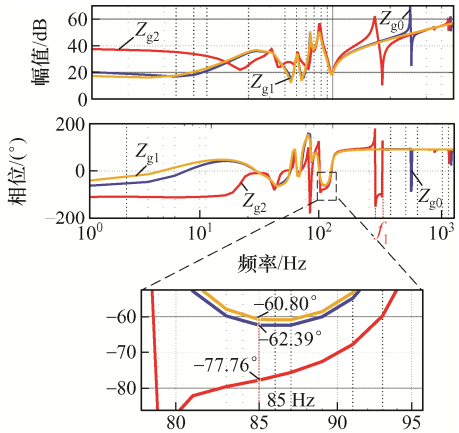


图 9 不同电网强度对 LCC 系统的影响规律

Fig. 9 Influence patterns of different grid strengths on LCC system

由图 7 可见，系统在电网阻抗 Z_g=0.08+0.12s 时会产生振荡，当电网强度增大且 Z_g=0.01+0.01s 时，Z_s 与 Z_{LCC} 的伯德图如图 10 所示。由图 10 可见，在交点频率 85 Hz 处，相位差为 154.62°，稳定裕度为 25.38°，此时系统稳定，其并网电压和电流波形如图 11 所示。

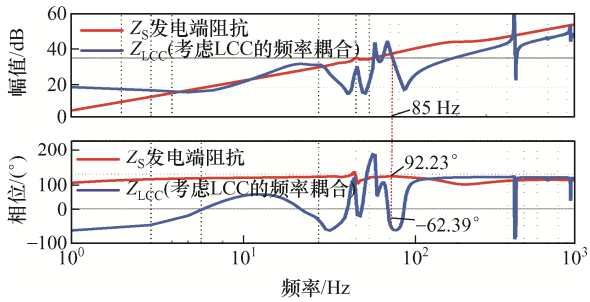


图 10 Z_g=0.01+0.01s 时阻抗交互伯德图

Fig. 10 Bode plot of impedance interaction at Z_g=0.01+0.01s

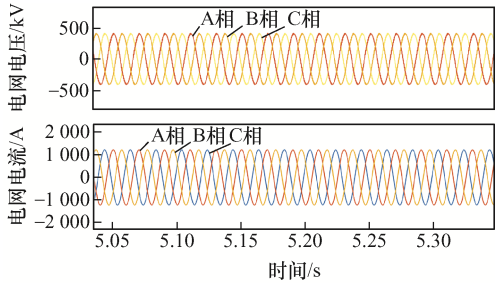


图 11　三相并网电压、电流波形

Fig. 11 Waveforms of three-phase grid-connected voltage and current

分析可得：①充分考虑 LCC 系统与 Z_s 的频率耦合效应后，更能准确分析 Z_s 和 Z_{LCC} 在次/超同步频段的负阻尼交互；②若能降低 LCC 系统与 Z_s 间的耦合作用，则能有效抑制负阻尼交互所产生的次/超同步振荡。

3　水风能源基地经 LCC-HVDC 送出系统的次/超同步振荡抑制策略

3.1　基于虚拟导纳的振荡抑制策略

为保障电力系统安全稳定运行，需针对水-风可再生能源经 LCC-HVDC 送出系统潜在的次/超同步振荡问题开展抑制策略研究。根据第 2 节的分析可知：LCC-HVDC 与 Z_s 在次/超同步频段的动态耦合作用是导致系统失稳的关键因素之一。因此，本文拟从减小特定频率下的 LCC 系统 Z_s 的角度出发，提出基于虚拟导纳控制的可再生能源场站阻抗重塑策略。在直驱风机网侧变流器控制中引入虚拟导纳，本质上是对风机输出电流进行重新修正，其控制结构如图 12 所示。图中：$i_{d,\mathrm{ref}}$、$i_{q,\mathrm{ref}}$分别为 d、q 轴下的参考电流；u_{rd}、u_{rq} 分别为 d、q 轴下的调制波信号；R_v、L_v 分别为虚拟电阻和虚拟电感；L_f 为滤波电感；$H_v(s)$、$H_i(s)$分别为直流电压环、电流环 PI 控制环节。

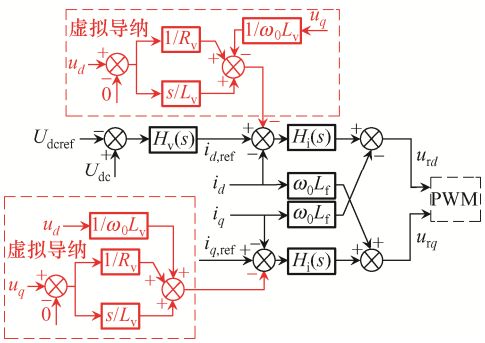


图 12　引入虚拟导纳的直驱风机控制环路结构

Fig. 12 Control loop configuration of direct-driven wind turbine incorporating virtual admittance

由图 12 可见，通过引入虚拟导纳重塑直驱风机端口电流的参考值，在系统级的输出特性上等效于在输出端口处并联 R_v 和 L_v。引入虚拟导纳后的等效并网结构如图 13 所示。图中，i_{PMSG}、i_{HTG} 分别为风场和水电机组的输出电流。

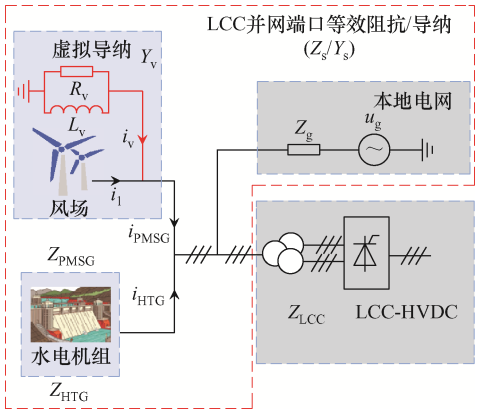


图 13　引入虚拟导纳后的等效并网结构

Fig. 13 Equivalent grid-connected structure incorporating virtual admittance

根据图 13 所示的等效并网结构，虚拟导纳侧输出的虚拟电流为

$$i_{\mathrm{vabc}} = -\left(\frac{U_{\mathrm{abc}}}{R_v} + \frac{1}{L_v}\int U_{\mathrm{abc}}\mathrm{d}t\right) \tag{13}$$

式中，U_{abc} 为三相静止坐标系下的并网点电压。

将式(13)变换到 dq 坐标系下有

$$\begin{cases} i_d = -\left[\dfrac{u_d}{R_v} + \dfrac{1}{L_v}\left(\int u_d\mathrm{d}t - \dfrac{u_q}{\omega_0}\right)\right] \\ i_q = -\left[\dfrac{u_q}{R_v} + \dfrac{1}{L_v}\left(\int u_q\mathrm{d}t + \dfrac{u_d}{\omega_0}\right)\right] \end{cases} \tag{14}$$

3.2　虚拟导纳的参数设计

当引入图 13 所示的虚拟导纳控制结构后，阻抗重塑后的直驱风机的自阻抗和伴随阻抗表达式分别为

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{PMSG,reshaping,sa}}(\omega_{\mathrm{p}}) = -Y_{\mathrm{ac1}}(\omega_{\mathrm{p}}) + \dfrac{Y_{\mathrm{ac0}}(\omega_{\mathrm{p}})Y_{\mathrm{dc1}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})}{Y_{\mathrm{C}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}}) - Y_{\mathrm{ms}}(\omega_{\mathrm{p}}) + Y_{\mathrm{dc0}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})} \\ Y_{\mathrm{PMSG,reshaping,aa}}(\omega_{\mathrm{p}}) = -Y^{*}_{\mathrm{ac2}}(\omega_{\mathrm{p}}) + \dfrac{Y^{*}_{\mathrm{ac0}}(\omega_{\mathrm{p}})Y^{*}_{\mathrm{dc2}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})}{Y_{\mathrm{C}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}}) - Y^{*}_{\mathrm{ms}}(\omega_{\mathrm{p}}) + Y^{*}_{\mathrm{dc0}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})} \end{cases} \tag{15}$$

式中：Y_{C}为直流母线电容的导纳；Y_{ms}为直驱风机逆变器直流侧的母线电容所对应的导纳；Y_{ac0}、Y_{ac1}、Y_{ac2}、Y_{dc0}、Y_{dc1}、Y_{dc2}为建模过程中的中间导纳，具体表达式为

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{ac0}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{p}})}{U_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{\dfrac{T_{\mathrm{pll}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})}{2}\left\{\left(I_{dq0} - \dfrac{U_{dq0}}{R_{\mathrm{v}}} - \dfrac{U_{dq0}}{\mathrm{j}\omega_0 L_{\mathrm{v}}}\right)[-H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}}) + \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}] + M_{dq0}U_{\mathrm{dc0}}\right\} - 1}{\mathrm{j}\omega_{\mathrm{p}}L + H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}}) - \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}} \\ Y_{\mathrm{ac1}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{p}}(2\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{\mathrm{p}})}{U^{*}_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{\dfrac{T_{\mathrm{pll}}(\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{\mathrm{p}})}{2}\left\{\left(I_{dq0} - \dfrac{U_{dq0}}{R_{\mathrm{v}}} - \dfrac{U_{dq0}}{\mathrm{j}\omega_0 L_{\mathrm{v}}}\right)[-H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{p}) + \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}] + M_{dq0}U_{\mathrm{dc0}}\right\}}{\mathrm{j}(2\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{\mathrm{p}})L + H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{p}) - \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}} \\ Y_{\mathrm{ac2}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{pdc}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})}{U_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{3}{2}\left\{\left(I_{dq0} - \dfrac{U_{dq0}}{R_{\mathrm{v}}} - \dfrac{U_{dq0}}{\mathrm{j}\omega_0 L_{\mathrm{v}}}\right)[-H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}}) + \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}] \Big/ U_{\mathrm{dc0}} + M_{dq0}\right\} \cdot \\ \qquad [Y_{\mathrm{ac1}} - 0.5I_{dq0}T_{\mathrm{pll}}(\omega_{\mathrm{p}}-\omega_{\mathrm{l}})] \end{cases} \tag{16}$$

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{dc0}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{p}}+\omega_{\mathrm{l}})}{U_{\mathrm{pdc}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{M_{dq0} + H_{\mathrm{v}}(\omega_{\mathrm{p}})H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}})}{\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{p}}+\omega_{\mathrm{l}})L + H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}) - \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}} \\ Y_{\mathrm{dc1}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{p}}(\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{\mathrm{p}})}{U_{\mathrm{pdc}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{M_{dq0} + H^{*}_{\mathrm{v}}(\omega_{\mathrm{p}})H^{*}_{gi}(\omega_{\mathrm{p}})}{\mathrm{j}(\omega_{\mathrm{l}}-\omega_{\mathrm{p}})L + H^{*}_{gi}(\omega_{\mathrm{p}}) + \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}} \\ Y_{\mathrm{dc2}}(\omega_{\mathrm{p}}) = \dfrac{I_{\mathrm{pdc}}(\omega_{\mathrm{p}})}{U_{\mathrm{pdc}}(\omega_{\mathrm{p}})} = \dfrac{3}{2}\left\{\left(I_{dq0} - \dfrac{U_{dq0}}{R_{\mathrm{v}}} - \dfrac{U_{dq0}}{\mathrm{j}\omega_0 L_{\mathrm{v}}}\right)[-H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}) + \mathrm{j}K_{\mathrm{gi}}] \Big/ U_{\mathrm{dc0}} + M_{dq0}\right\} Y_{\mathrm{dc1}}(\omega_{\mathrm{p}}) + \\ \qquad \dfrac{3}{2}\dfrac{I_{dq0}}{U_{\mathrm{dc0}}} H_{\mathrm{v}}(\omega_{\mathrm{p}})H_{\mathrm{gi}}(\omega_{\mathrm{p}}) \end{cases} \tag{17}$$

式中：I_{p}和 U_{p}分别为不同频率的扰动电流和扰动电压，$T_{\mathrm{pll}}(\cdot)$为锁相环的闭环传递函数；I_{dq0}和 U_{dq0}分别为 dq 轴下的稳态电流、电压；I_{pdc}和 U_{pdc}分别为直流电流、电压小信号；M_{dq0}为稳态下的调制信号；K_{gi}为 dq 轴解耦系数；$H_{\mathrm{v}}(\cdot)$为电压环控制函数；$H_{\mathrm{gi}}(\cdot)$为电流环控制函数。

引入虚拟导纳后 Z_{s}可表示为

$$\begin{cases} Y_{\mathrm{s}}(s) = \dfrac{1}{Z_{\mathrm{RE}}(s)} + \dfrac{1}{Z_{\mathrm{g}}(s)} + \dfrac{1}{R_{\mathrm{v}}} + \dfrac{1}{L_{\mathrm{v}}s} \\ Z_{\mathrm{s}}(s) = 1/Y_{\mathrm{s}}(s) \end{cases} \tag{18}$$

其中 Z_{RE}如式(11)所示。通过合理设置虚拟导纳 L_{v}和 R_{v}的取值可对 Z_{s}进行修正，从而有效削弱 LCC-HVDC 系统频率耦合的影响。相较于直接在并网点并联电阻或电感，采用虚拟导纳具备能量损耗小且控制参数灵活可调的优势，兼顾了经济性及灵活性。

此时若系统的振荡频率为 f_{p}，则应重点削弱 LCC-HVDC 系统在 f_{p}处的频率耦合现象，即让 Z_{s}在该频率处的幅值和相位均为 0，因此有

$$\begin{cases} \left|Z_{\mathrm{s}}(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{p}})\right| = 0 \\ \angle Z_{\mathrm{s}}(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{p}}) = 0 \end{cases} \tag{19}$$

对式(18)进行求解，可得对应的 R_{v}和 L_{v}，以图 7 中所得的 f_{p}=84 Hz 为例，代入 Z_{g}=0.08+0.12s，可得 R_{v}=187.53 Ω，L_{v}=−363.21 mH。此时，绘制引入虚拟导纳控制后的 Z_{s}与 Z_{LCC}的阻抗交互伯德图，

如图 14 所示。

由图 14 可见，在直驱风机控制环中加入虚拟导纳后，Z_s 在次/超同步频段的相位明显变小，使得其在 84 Hz 左右处的相位差明显小于 180°，且其余频段幅值交点处的相位差同样小于 180°，因此有效抑制了系统中潜在的次/超同步振荡风险。然而，在某些特殊工况下可能在引入虚拟导纳后存在新的频率振荡，此时可以参考图 15 所示的流程，对虚拟导纳参数取值进行迭代设计，寻找使得联合送出系统稳定的虚拟导纳。

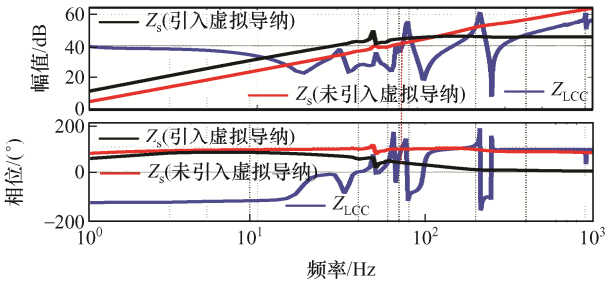


图 14　引入虚拟导纳后 Z_s 和 Z_{LCC} 阻抗交互伯德图

Fig. 14 Bode plot of impedance interaction between Z_s and Z_{LCC} with virtual admittance introduced.

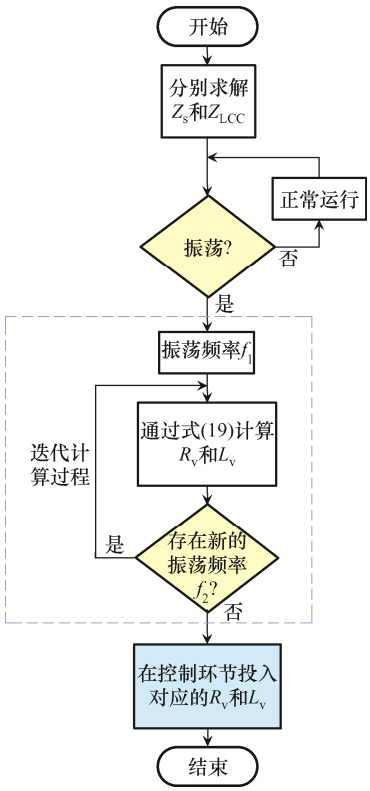


图 15　虚拟导纳参数设计流程

Fig. 15 Flow chart of virtual admittance parameter design

4　仿真验证

为验证虚拟导纳对振荡抑制的有效性，本文在 MATLAB/Simulink 仿真平台中搭建了图 1 所示的水-风可再生清洁能源经 LCC-HVDC 送出系统的电磁暂态仿真模型。

仿真工况条件：0~4 s 时段系统工作在稳定工况，4 s 时刻电网阻抗跳变为 Z_g=0.08+0.12s，8 s 时刻投入虚拟导纳控制。水-风可再生清洁能源并网点电压和电流仿真波形如图 16 所示。

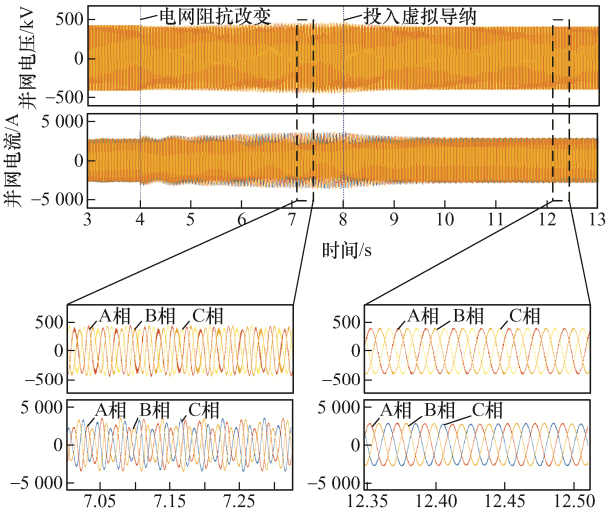
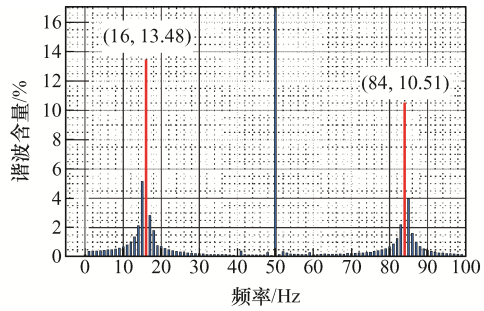


图 16　水-风可再生清洁能源并网点电压和电流波形

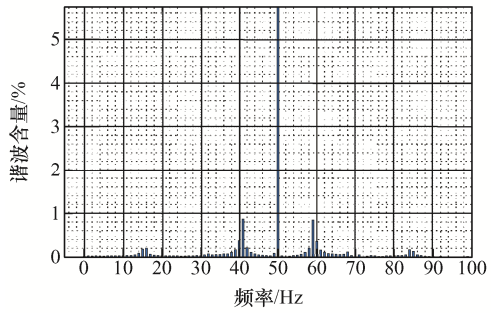
Fig. 16 Waveforms of voltage and current at grid-connected point of hydro-wind renewable clean energy

由图 16 可见：在 4~8 s 时段，系统存在明显的次/超同步振荡现象，且振荡幅值有逐渐增大的趋势；在 8 s 时刻投入虚拟导纳后，系统的振荡幅值逐渐减小直至被抑制。投入虚拟导纳前、后的并网电流快速傅里叶变换 FFT(fast Fourier transform)分析结果如图 17 所示。

由图 17(a)可见，在投入虚拟导纳前，系统中含有 84 Hz 和 16 Hz 的振荡谐波，与图 7 的阻抗分析结果相符；由图 17(b)可见，在引入虚拟导纳后，系统的次/超同步振荡得到了有效抑制，其谐波含量不足 1%，验证了本文所提基于虚拟导纳的水-风可再生清洁能源经 LCC 送出系统次/超同步振荡抑制策略的有效性。



(a) 投入虚拟导纳前



(b) 投入虚拟导纳后

图 17 水−风可再生清洁能源并网点电流 FFT 分析结果

Fig. 17 FFT analysis results of current at grid-connected point of hydro-wind renewable clean energy

5 结论

本文针对水−风可再生清洁能源经 LCC-HVDC 送出系统开展了次/超同步振荡分析及抑制策略的研究。首先从系统层面建立了联合系统的阻抗交互模型，分析了系统振荡的关键影响因素，接着提出了基于虚拟导纳的次/超同步振荡抑制策略，最后通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了本文理论分析的准确性及振荡抑制策略的有效性。本文得出了以下结论。

(1)通过减小 LCC-HVDC 系统在 f_p 与 z_s 的交互耦合作用，能有效抑制系统的次/超同步振荡。

(2)本文所提虚拟导纳控制能有效重塑水−风可再生清洁能源的 Z_s，使其与 Z_{LCC} 的相位差远小于 180°，实现了对振荡的有效抑制。

参考文献：

[1] 马文龙, 王程, 毕天姝. 支撑受端频率的水光互补新能源基地−多端柔直协同控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(3): 1049-1064.
Ma Wenlong, Wang Cheng, Bi Tianshu. Cooperative control method of hydro-photovoltaic complementary renewable generation base-MTDC system for frequency support of the receiving-end [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(3): 1049-1064. (in Chinese)

[2] 赖昕杰. 水轮发电机组调速系统稳定性与过渡过程控制优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Lai Xinjie. Research on stability and transient process control optimization of hydro-turbine governing system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[3] Chang Xiaolin, Liu Xinghong, Zhou Wei. Hydropower in China at present and its further development [J]. Energy, 2010, 35(11): 4400-4406.

[4] 何向刚, 张树卿, 马蕊, 等. 送端电网新能源规划中的场景化稳定问题分析与校核[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(12): 72-82.
He Xianggang, Zhang Shuqing, Ma Rui, et al. Scenario-based stability analysis and check of new energy generation planning in sending power grid [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(12): 72-82. (in Chinese)

[5] 徐秋实, 施通勤, 井浩然, 等. 面向新型电力系统的输电网与分布式变速抽水蓄能联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(10): 128-137.
Xu Qiushi, Shi Tongqin, Jing Haoran, et al. Joint planning of a transmission network and distributed variable speed pumped storage for a new power system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(10): 128-137. (in Chinese)

[6] Zhang Yufeng, Yang Shuying, Xie Zhen, et al. Design scheme of signal-to-noise ratio for broadband generalized grid impedance identification [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 9001512.

[7] Mu Han, Zhang Yao, Tong Xiangqian, et al. Impedance-based stability analysis methods for DC distribution power system with multivoltage levels [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9193-9208.

[8] Xu Yunyang, Nian Heng, Wang Tao, et al. Frequency coupling characteristic modeling and stability analysis of

doubly fed induction generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(3): 1475-1486.

[9] 罗永捷, 黄鹏, 段修超, 等. 考虑海上风电与 MMC 阻抗耦合的柔性直流送出系统等效阻抗建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2655-2669.
Luo Yongjie, Huang Peng, Duan Xiuchao, et al. Equivalent impedance modeling method for MMC-HVDC considering coupling of offshore wind power and MMC impedance [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2655-2669. (in Chinese)

[10] 查子健, 刘斌. 双馈变速抽水蓄能机组发电工况阻抗建模[J]. 中外能源, 2024, 29(6): 33-38.
Zha Zijian, Liu Bin. Impedance modeling of doubly-fed variable speed pumped storage unit in generator operating mode [J]. Sino-Global Energy, 2024, 29(6): 33-38. (in Chinese)

[11] 朱珠, 潘文霞, 刘铜锤, 等. 变速抽蓄机组频率响应机理模型与性能研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 463-472.
Zhu Zhu, Pan Wenxia, Liu Tongchui, et al. Frequency response mechanism modeling and performance analysis of adjustable-speed pumped storage unit [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 463-472. (in Chinese)

[12] 陈雪梅, 陆超, 韩英铎. 电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 1-9.
Chen Xuemei, Lu Chao, Han Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1-9. (in Chinese)

[13] Zou Xiaoming, Du Xiong, Tai Hengming. Two-variable admittance model for D-PMSG-based wind turbine and stability criterion based on magnitude and phase contour plot [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1484-1498.

[14] Yu Yanan, Qin Shuai, Fang Hui, et al. Impedance modeling and stability analysis of LCC-HVDC transmission system [C]// 2024 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). Zhuhai, China, 2025: 815-820.

[15] 张琦, 杜雄, 丁理杰, 等. 全功率变速抽水蓄能机组的阻抗建模及并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(13): 4229-4240.
Zhang Qi, Du Xiong, Ding Lijie, et al. Impedance modeling and grid-connected stability analysis of variable-speed pumped storage unit with full-size converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(13): 4229-4240. (in Chinese)

[16] 黄阮明, 王晓晖, 李强, 等. 海上风电经柔性直流送出系统高频振荡分析及抑制策略[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(1): 43-52.
Huang Ruanming, Wang Xiaohui, Li Qiang, et al. High frequency oscillation analysis and suppression strategy of offshore wind power through MMC-HVDC system [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(1): 43-52. (in Chinese)

[17] 郝为瀚, 谭威, 黄阳, 等. 基于无源阻尼的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(3): 23-31.
Hao Weihan, Tan Wei, Huang Yang, et al. High-frequency oscillation suppression strategy of MMC-HVDC based on passive damping method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(3): 23-31. (in Chinese)

[18] 邵冰冰, 赵书强, 高本锋, 等. 基于反馈线性化滑模控制的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3090-3105.
Shao Bingbing, Zhao Shuqiang, Gao Benfeng, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy of direct-drive wind farms via VSC-HVDC system based on feedback linearization sliding mode control [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3090-3105. (in Chinese)

[19] Zhu Jianhang, Hu Jiabing, Lin Lei, et al. High-frequency oscillation mechanism analysis and suppression method of VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8892-8896.

[20] 杨树德, 李旺, 张新闻, 等. 一种提高变流器弱电网适应能力的虚拟阻抗控制策略[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 158-166.
Yang Shude, Li Wang, Zhang Xinwen, et al. Virtual impedance control strategy for improving the adaptability of converter to weak grid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 158-166. (in Chinese)

[21] 吴嘉琪, 罗念华, 朱劲磊, 等. 用于 VSC-HVDC 系统谐波抑制的 PI 与 VPI 并联控制[J]. 电源学报, 2024,

22(6): 130-138.
Wu Jiaqi, Luo Nianhua, Zhu Jinlei, et al. PI parallel VPI control for harmonic suppression of VSC-HVDC system [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 130-138. (in Chinese)

[22] 李浩志, 李景一, 杨建军, 等. 抑制风电-柔直外送系统次同步振荡的并联 VSC 型次同步阻尼控制器[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 133-139.
Li Haozhi, Li Jingyi, Yang Jianjun, et al. Shunt-VSC subsynchronous damping controller to suppress SSO in wind power connected by flexible DC sending system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 133-139. (in Chinese)

[23] 彭意, 郭春义, 杜东冶. 柔性直流输电的阻抗重塑及中高频振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8053-8062.
Peng Yi, Guo Chunyi, Du Dongye. Research on medium and high frequency oscillation suppression approach based on impedance tuning in flexible HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8053-8062. (in Chinese)

[24] 王红星, 郭敬梅, 谢志文, 等. 海上风电次/超同步振荡的网侧附加阻尼抑制方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 49-55.
Wang Hongxing, Guo Jingmei, Xie Zhiwen, et al. Grid-side supplementary damping suppression method of sub- & super-synchronous oscillation in offshore wind farms [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 49-55. (in Chinese)

[25] 卢新宇. 基于阻抗法的风电基地次/超同步振荡分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
Lu Xinyu. Analysis of wind power base sub-/super-synchronous oscillation based on impedance method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)



凌子玥

作者简介：

凌子玥(2001—)，女，硕士研究生。研究方向：新能源并网系统稳定性。E-mail：202411131202T@stu.cqu.edu.cn。

米文超(1983—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：大型水电站励磁直流设备维护技术研究。E-mail：mi_wenchao@ctg.com.cn。

马庭豪(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：新能源并网系统稳定性。E-mail：202211131302@stu.cqu.edu.cn。

夏建华(1977—)，男，本科，高级工程师。研究方向：电气二次设备维护技术研究。E-mail：xia_jianhua@ctg.com.cn。

罗腾(1987—)，男，本科，工程师。研究方向：大型水电站励磁直流设备维护技术研究。E-mail：luo_teng@ctg.com.cn。

杜雄(1979—)，男，通信作者，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子系统稳定性，电力电子系统可靠性。E-mail：duxiong@cqu.edu.cn。

(责任编辑：耿越)