

# 含光伏接入的双端交直流混合配电系统 稳定性及交互作用分析

葛津铭<sup>1</sup>, 董育玮<sup>1</sup>, 张明泽<sup>2</sup>, 王振浩<sup>1</sup>, 王朝斌<sup>1</sup>, 尹瑜<sup>1</sup>, 王尉<sup>1</sup>, 翟俊龙<sup>1</sup>  
(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省 吉林市 132012;  
2. 国网长春供电公司, 吉林省 长春市 130021)

## Analysis of the Stability and Interaction of Dual-terminal AC/DC Hybrid Distribution System With PV Integration

GE Jinming<sup>1</sup>, DONG Yuwei<sup>1</sup>, ZHANG Mingze<sup>2</sup>, WANG Zhenhao<sup>1</sup>, WANG Chaobin<sup>1</sup>,  
YIN Yu<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZHAI Junlong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology  
(Northeast Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, Jilin Province, China;  
2. State Grid Changchun Power Supply Company, Changchun 130021, Jilin Province, China)

**ABSTRACT:** The AC/DC hybrid power distribution system is an important form of future power distribution systems. The dynamic interaction between the AC and DC systems restricts its stable operation. This paper examines the impact of power electronic device interactions on the stability of AC and DC power distribution systems. By constructing a model of the AC/DC hybrid power distribution system with photovoltaic grid connection, the interactions between the photovoltaic grid connection on the AC and DC sides and their influence on system stability are analyzed. Firstly, a small-signal model of the AC/DC hybrid system with AC and DC photovoltaic grid connection was established. Then, the mechanism of the dynamic interaction between the AC and DC sides of the photovoltaic grid connection was qualitatively analyzed. Considering the different power flow directions, the amplitude-frequency characteristics of the mutual influence components and the trajectory of the dominant mode change in the system under different system parameters were studied to analyze the interaction's influence on system stability. The results show that the transmission of the interaction between the AC and DC sides is affected by parameters such as the control of the interconnection converter, and that changes in power flow direction alter its transmission characteristics. Finally, the correctness of the analysis results was verified through simulation analysis.

**KEY WORDS:** AC/DC hybrid power distribution system; oscillation; small-signal stability; interaction; photovoltaic

**摘要:** 交直流混合配电系统作为未来配电系统的重要形式, 其稳定运行受交直流间系统动态交互作用限制, 该文研究了交直流两侧配电网中电力电子设备交互作用对配电系统稳定性的影响。通过构建含光伏并网的交直流混合配电系统模型, 研究交直流侧光伏并网系统导致的交互作用及其对系统稳定性的影响。首先, 建立了含交直流光伏并网的交直流混合系统小信号模型。然后, 分析了交直流侧光伏动态交互作用产生的机理, 并在考虑功率不同流向的情况下, 通过研究系统不同参数下互影响分量幅频特性和系统主导模态变化轨迹, 研究了交互作用对系统稳定性的影响规律。研究表明, 交直流侧交互作用的传递受互联变换器控制等参数的影响, 且功率流向改变影响其传递特性。最后, 通过仿真分析验证了分析结果的正确性。

**关键词:** 交直流混合配电系统; 振荡; 小信号稳定性; 交互作用; 光伏

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0723

## 0 引言

“双碳”背景下, 大规模可再生能源经电力电子设备并入电网, 使电力系统朝着“高比例可再生能源”和“高比例电力电子设备”的趋势发展。大规模电力电子设备接入系统下引起的振荡问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。与传统电力系统相比, 交直流混合系统在时间上呈现多时间尺度、空间上呈现跨区域耦合特性, 其极易产生复杂交互作用和振荡传播等现象<sup>[3]</sup>, 系统稳定性问题较为突出, 目前已成为学术广泛关注的热点。

已有一些学者对交直流混合配电网中设备交

基金项目: 吉林省自然科学基金项目(YDZJ202401582ZYTS)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Jilin Province (YDZJ202401582ZYTS).

互影响进行研究,文献[4]对比分析不同控制方式下的电压源型逆变器(voltage source converter, VSC)与直流网络的交互特性,并提出灵活可拓展的模块化小信号模型,并基于此模型对比研究了不同控制下系统稳定性及其差异。文献[5]从外环控制的角度出发,对比分析了3种不同控制外环下对VSC双机系统的影响,揭示了外环控制扰动传播路径。文献[6]研究了具有高动态负荷渗透水平的并网配电系统的相互作用动力学和性能,发现由于各种动态相互作用,并网配电系统中的动态负荷会出现不稳定问题。文献[7]探究了动态单元交互作用对直流电网稳定性的影响,通过模式分析法发现动态交互作用对系统阻尼存在影响,并提供量化评估指标。文献[8]对接入弱电网下的构网型与跟网型变流器并联系统建立交互作用分析模型,并研究了其交互作用对系统稳定性的影响。上述研究仅分析了交直流电网的单侧系统中单元间的交互作用对系统影响,然而两侧系统中动态单元同样会通过互联变换器产生交互影响<sup>[9-10]</sup>,因此需要对交直流系统两侧之间的交互影响进行研究。

当交直流电网中出现局部振荡时,会通过互联变换器产生振荡传递现象<sup>[11]</sup>,且有可能产生振荡放大效果,进而导致系统振荡失稳<sup>[12-13]</sup>。文献[14]基于频域模式分析法,建立频域下交直流微电网等效阻抗模型,提出了交直流电网振荡的传播特性分析方法,确定了振荡在交直流系统间传播特性。文献[15]提出一种适用于复杂电网的等效交互作用模型构建方法,该方法无须对子网进行等效,并基于该模型分析谐振交互作用机理,明确了谐振放大风险频域。文献[16]通过建立并网和孤网运行状态下混联微电网系统多输入多输出模型,定性分析动态交互作用传递过程。研究表明,两种状态下均有可能发生强动态交互作用并导致失稳。上述研究多针对微电网场景下分析交直流间交互作用,其与配电网相比,交流配电网缺少上级电网的支撑,同时在分析过程中多将电网中的互联变换器等设备处理成阻抗及节点的形式,忽略了设备内部控制等环节,且没有考虑功率流向问题对交互作用的影响,以上研究仍有局限性。

互联变换器的耦合特性会影响交互作用的传递过程<sup>[17-18]</sup>,且随着功率流向的改变其耦合特性会产生差异性进而对交互作用产生不同的影响。文献[19]以交直流微网中双向DC/AC变流器和DC/DC变流器构成的级联系统为研究对象,揭示了LC滤波器和功率传输方向会改变级联系统等效阻抗,进而影

响稳定性。文献[20]对背靠背式交直流混合系统进行阻抗建模,对比分析了正反向功率下的阻抗特性差异,并提出了一种协调优化控制策略,使其同时优化双向功率下的稳定性。现有研究表明互联变换器对系统交互作用影响存在双向差异。

本文在配电网场景下,对交直流间设备交互作用过程进行分析,以交直流配电网中接入光伏设备为研究对象,同时考虑了功率流向的影响,建立含光伏动态单元的双端交直流混合配电网小信号模型,确定系统振荡模态存在交直流两侧共参与作用结果;分析两侧电网中光伏单元交互过程,并建立了交互作用模型,分析了互联变换器参数改变时交互作用对系统稳定性影响的机理;通过控制互联变换器改变其功率流向,研究不同功率流向下互联变换器耦合特性,进而分析同样参数变化下,对交互作用的影响差异。最后通过仿真分析验证了互联变换器对交互作用影响规律,以及功率流向改变对其造成的影响。

## 1 交直流混合配电网系统模型建立

本文采用典型双端交直流混合配电网系统结构如图1所示<sup>[21]</sup>,交直流系统中均含有光伏发电单元。

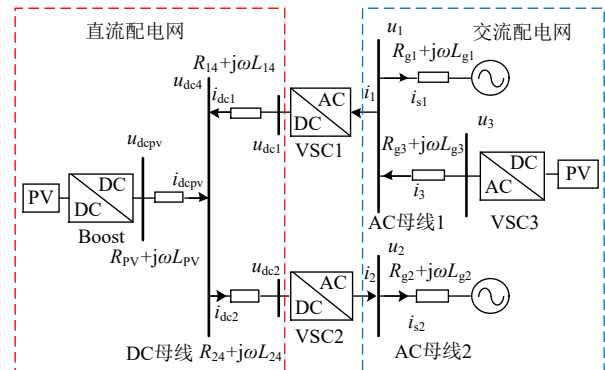


图1 交直流混合配电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of AC/DC hybrid distribution system structure

交直流混合配电网通过柔性互联实现交流网络和直流网络互联,通过对互联装置的控制能够实现功率的双向流动,在双端交直流混合系统中,VSC1为主站采用定直流电压控制,其控制目标是维持直流侧电压的稳定,VSC2作为从站采用定功率控制,可以控制功率的流向。交流电网和直流电网中光伏发电单元分别通过Boost电路和VSC3连接到交直流母线上,为研究交直流混合配电网中直流和交流光伏发电单元间相互影响,建立交直流混合配电网小信号模型。

### 1.1 柔性互联装置模型

如图2所示互联变换器控制内环采用电流解耦

控制, VSC1 外环采用  $U_{dc}-Q$  控制策略, VSC2 外环采用  $P-Q$  控制策略, 设交流侧注入功率  $P+jQ$  为正方向。  $u_{ci}(i=1,2)$  和  $i_{ci}$  分别为变换器交流端电压和端电流;  $u_i$  为公共连接点(point of common coupling, PCC)电压;  $C_{fi}$  和  $L_{ci}$  分别为端口滤波电容和电感;  $\omega$  为交流系统的角速度(并网状态下  $\omega=100\pi$ );  $C_{dci}$  为直流母线电容;  $i_{dci}$  和  $u_{dci}$  分别为直流侧端口电流和电压;  $x_{plli}$  为锁相环积分环节状态变量;  $\theta_{plli}$  为偏转角。

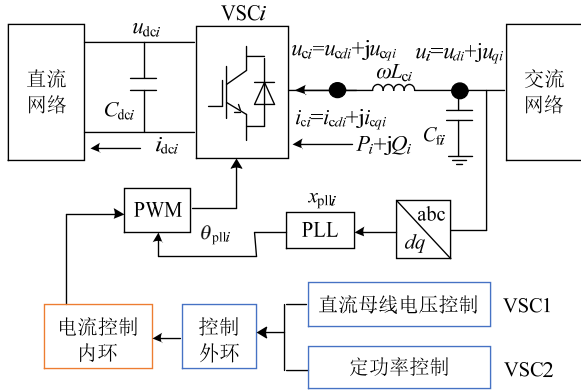


图2 互联变换器连接交直流配电网结构图

Fig. 2 Structure diagram of the interconnected converter connecting AC/DC distribution network

图3(a)和(b)分别为 VSC1 和 VSC2 控制结构。  $u_{dc1}^{ref}$  和  $Q_1^{ref}$  分别为 VSC1 直流电压及系统无功功率参考值;  $P_2^{ref}$  和  $Q_2^{ref}$  分别为 VSC2 系统有功功率及无功功率参考值;  $I_{cd1}^{ref}$ 、 $I_{cq1}^{ref}$ 、 $I_{cd2}^{ref}$ 、 $I_{cq2}^{ref}$  分别为 VSC1 和 VSC2 的 PCC 点电流向量的  $dq$  轴分量参考值;  $k_{pk}$  和  $k_{ik}$  ( $k=1\sim 8$ ) 分别为相应比例积分(proportional-integral, PI)环节的比例和积分系数; 状态变量  $x_1\sim x_4$  和  $x_5\sim x_8$  分别为 VSC1 和 VSC2 的积分环节输入量, 对应方程见式(1)(2)。

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = (I_{cd1}^{ref} - i_{cd1}) \\ \frac{dx_2}{dt} = (I_{cq1}^{ref} - i_{cq1}) \\ \frac{dx_3}{dt} = (u_{dc1}^{ref} - u_{dc1}) \\ \frac{dx_4}{dt} = (Q_1^{ref} - \Delta Q_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dx_5}{dt} = (I_{cd2}^{ref} - i_{cd2}) \\ \frac{dx_6}{dt} = (I_{cq2}^{ref} - i_{cq2}) \\ \frac{dx_7}{dt} = (P_2^{ref} - P_2) \\ \frac{dx_8}{dt} = (Q_2^{ref} - Q_2) \end{cases} \quad (2)$$

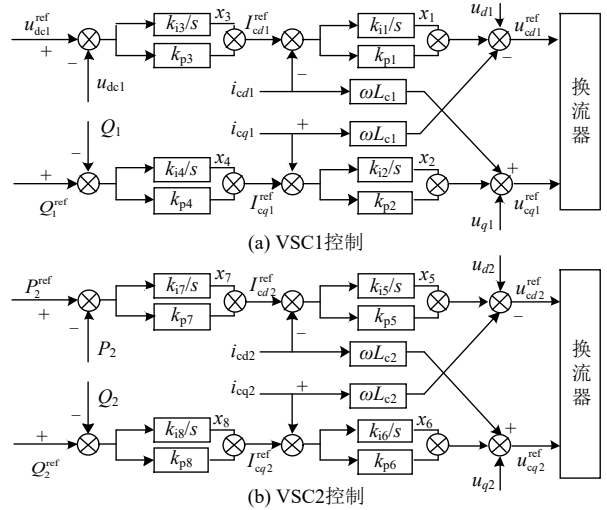


图3 VSC1 和 VSC2 控制框图

Fig. 3 Control block diagrams of VSC1 and VSC2

两逆变器整流接口外环控制器方程见式(3)。

$$\begin{cases} I_{cd1}^{ref} = k_{i3}x_3 + k_{p3}(u_{dc1}^{ref} - u_{dc1}) \\ I_{cq1}^{ref} = k_{i4}x_4 + k_{p4}(Q_1^{ref} - Q_1) \\ I_{cd2}^{ref} = k_{i5}x_7 + k_{p5}(P_2^{ref} - P_2) \\ I_{cq2}^{ref} = k_{i6}x_8 + k_{p6}(Q_2^{ref} - Q_2) \end{cases} \quad (3)$$

直流母线电容电压的空间状态方程见式(4)。

$$C_{dci} \frac{du_{dci}}{dt} = \frac{1.5(u_{cdi}i_{cdi} + u_{cqi}i_{cqi})}{u_{dci}} - i_{dci} \quad (4)$$

逆变器交流侧 LC 滤波电路、锁相环坐标变换等建模过程受篇幅限制不再赘述, 对上述方程进行线性化处理得出互联变换器的小信号状态空间模型由式(5)给出:

$$\Delta \dot{X}_{VSCi} = A_{VSCi} \Delta X_{VSCi} + B_{VSCi} \Delta i_{dqdci} \quad (5)$$

式中:  $A_{VSCi}$ 、 $B_{VSCi}$  为系数矩阵;  $\Delta X_{VSCi} = [\Delta i_{cdqi} \ \Delta u_{dq} \ \Delta x_1 \ \dots \ \Delta x_8 \ \Delta x_{plli} \ \Delta \theta_{plli}]^T$ ;  $\Delta i_{dqdci} = [\Delta i_{cdi} \ \Delta i_{cqi}]^T$ ;  $\Delta u_{dqdci} = [\Delta u_{di} \ \Delta u_{qi} \ \Delta u_{dci}]^T$ ;  $\Delta i_{dqdci} = [\Delta i_{di} \ \Delta i_{qi} \ \Delta i_{dci}]^T$ 。

## 1.2 交直流配电网及光伏单元模型

在图 1 的交直流配电网中: AC 母线与上级电网相连, 由理想电压源  $E$  表示;  $L_{gi}$ 、 $R_{gi}$  ( $i=1,2,3$ ) 为交流输电线路电感和电阻。交流侧光伏经 VSC3 通过馈线连接到交流母线上, 线路传输模型如式(6)所示,  $A_{g3}$ 、 $B_{g3}$  见附录式(A1)(A2)。

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{sdqi} \\ \Delta i_{dq3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{gi} \\ A_{g3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{sdqi} \\ \Delta i_{dq3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{gi} \\ B_{g3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{dq} \\ \Delta u_{dq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

AC 母线电流关系如式(7)所示。

$$\begin{cases} i_{d1} = i_{d3} + i_{sd1} \\ i_{q1} = i_{q3} + i_{sq1} \\ i_{d2} = i_{sd2} \\ i_{d2} = i_{sq2} \end{cases} \quad (7)$$

直流配电网中：互联变换器 VSC1 和 VSC2 与直流侧光伏经传输线路连接到 DC 母线上； $R_{i4}$ 、 $L_{i4}$ 、 $R_{pV}$ 、 $L_{pV}(i=1,2)$ 为传输线路阻抗； $i_{dcPV}$ 为线路传输电流； $u_{dc4}$ 为直流母线电压，交直流线路传输模型见式(8)。

$$\begin{cases} L_i \frac{di_{dci}}{dt} = -R_{i4}i_{dci} + u_{dci} - u_{dc4} \\ L_{pv} \frac{di_{dcPV}}{dt} = -R_{pv}i_{dcPV} + u_{dcPV} - u_{dc4} \\ C_{dc4} \frac{du_{dc4}}{dt} = i_{dc1} + i_{dc2} + i_{dcPV} \end{cases} \quad (8)$$

对式(8)进行线性化，可得直流传输线路小信号模型为

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{dci} \\ \Delta i_{dcPV} \\ \Delta u_{dc4} \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{gdc} \begin{bmatrix} \Delta i_{dci} \\ \Delta i_{dcPV} \\ \Delta u_{dc4} \end{bmatrix} + \mathbf{B}_{gdc} \begin{bmatrix} \Delta u_{dci} \\ \Delta u_{dcPV} \end{bmatrix} \quad (9)$$

与式(6)合并得交直流混合配电网传输线路小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_g = \mathbf{A}_g \Delta \mathbf{X}_g + \mathbf{B}_g \Delta \mathbf{U}_g \quad (10)$$

式中： $\mathbf{A}_g$ 、 $\mathbf{B}_g$ 为系数矩阵； $\Delta \mathbf{X}_g = [\Delta i_{sdqi} \ \Delta i_{dq3} \ \Delta i_{dci4} \ \Delta i_{dcPV} \ \Delta u_{dc4}]^T$ ； $\Delta \mathbf{U}_g = [\Delta E_{dqi} \ \Delta u_{dq3} \ \Delta u_{dci} \ \Delta u_{dcPV}]^T$ ； $\Delta i_{sdqi} = [\Delta i_{sdi} \ \Delta i_{sqi}]^T$ ； $\Delta i_{dq3} = [\Delta i_{d3} \ \Delta i_{q3} \ \Delta u_{dci}]^T$ ； $\Delta i_{dci} = [\Delta i_{dci1} \ \Delta i_{dci2}]^T$ 。

交流侧光伏逆变器控制策略如图 4 所示，外环采用定电压控制、内环为电流矢量控制。 $i_{cd3}^{ref}$ 、 $i_{cq3}^{ref}$ 分别为 PCC 点电流向量的 dq 轴分量参考值；状态变量  $x_9$ — $x_{11}$  为 VSC3 的积分环节输入量，对应方程见式(11)。

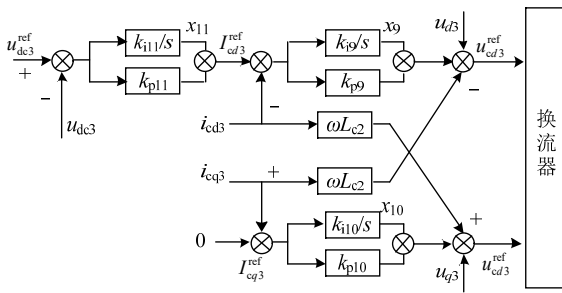


图 4 光伏并网逆变器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of the photovoltaic grid-connected inverter

$$\begin{cases} \frac{dx_9}{dt} = k_{i9}(I_{cd3}^{ref} - i_{cd3}) \\ \frac{dx_{10}}{dt} = k_{i10}(I_{cq3}^{ref} - i_{cq3}) \\ \frac{dx_{11}}{dt} = k_{i11}(u_{dc1}^{ref} - u_{dc1}) \end{cases} \quad (11)$$

并网逆变器交流侧 LC 滤波电路、锁相环等建模过程与互联变换器相同，并网逆变器模型如

式(12)所示。

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{VSC3} = \mathbf{A}_{VSC3} \Delta \mathbf{X}_{VSC3} + \mathbf{B}_{VSC3} \Delta \mathbf{i}_{dqde3} \quad (12)$$

直流侧光伏通过 Boost 变换器接入直流母线，并采用最大功率跟踪控制 MPPT 其结构如图 5 所示。图 5 中： $u_{pV}$ 和  $i_{pV}$ 为输入电压电流； $L_{pV}$ 为滤波电感； $C_{pV1}$ 和  $C_{pV2}$ 为滤波电容； $i_{LPV}$ 为电感电流； $u_{dcPV}$ 为输出电压； $i_{dcPV}$ 为输出电流； $d_{pV}$ 为 Boost 变换器占空比； $k_{i_{pV}}$ 和  $k_{p_{pV}}$ 为变换器积分环节。根据图 5 得到 Boost 变换器的状态空间方程如式(13)所示。

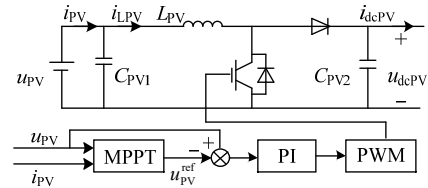


图 5 光伏 Boost 变换器拓扑结构及控制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the topology and control strategy of the photovoltaic Boost converter

$$\begin{cases} u_{pV} = L_{pV} \frac{di_{LPV}}{dt} + (1 - d_{pV})u_{dcPV} \\ i_{dcPV} = (1 - d_{pV})i_{LPV} - C_{pV2} \frac{du_{dcPV}}{dt} \\ i_{pV} = i_{LPV} + C_{pV1} \frac{du_{pV}}{dt} \\ \frac{dx_{pV}}{dt} = u_{pV}^{ref} - u_{pV} \\ d_{pV} = k_{i_{pV}}x_{pV} + k_{p_{pV}}(u_{pV}^{ref} - u_{pV}) \end{cases} \quad (13)$$

整理线性化后得 Boost 小信号模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{X}}_{Boost} = \mathbf{A}_{Boost} \Delta \mathbf{X}_{Boost} + \mathbf{B}_{Boost} \Delta \mathbf{i}_{pV} \quad (14)$$

式中： $\mathbf{A}_{Boost}$ 、 $\mathbf{B}_{Boost}$ 为系数矩阵； $\Delta \mathbf{X}_{Boost} = [\Delta i_{LPV} \ \Delta u_{dcPV} \ \Delta u_{pV} \ \Delta x_{pV}]^T$ 。

将前文所述互联变换器及所连交直流配电网传输线路、光伏发电设备的线性化模型联立，整理得到 46 阶交直流混合配电网全局线性化模型为

$$\Delta \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{U} \quad (15)$$

式中： $\Delta \mathbf{X}$ 为系统状态变量； $\Delta \mathbf{U}$ 为系统输入变量； $\Delta \mathbf{X} = [\Delta \mathbf{X}_{VSCi} \ \Delta \mathbf{X}_g \ \Delta \mathbf{X}_{Boost}]^T$ ； $\Delta \mathbf{U} = [\Delta E_{dqi} \ \Delta i_{dc3} \ \Delta i_{pV}]^T$ 。

## 2 交直流混合配电网振荡模态及交互影响分析

在交直流混合配电网中，VSC 与 Boost 等电力电子设备因带宽控制环节的差异，易诱发系统振荡问题，其振荡与滤波器谐振、电力电子控制策略等密切相关，为揭示交直流间交互机制，本节通过分析特征根和参与因子，确定交直流系统间存在交互影响，并建立交互作用分析模型，分析交直流两侧

光伏间交互影响的传播路径。

## 2.1 振荡模态分析

研究中为便于描述小扰动模态与状态变量的关联性,明确系统间相互作用的动态环节,引入参与因子分析振荡模态以及相对应的状态变量。系统参数如表 A1 所示,小信号模型所得特征值 $\lambda_1\text{--}\lambda_{46}$ 均位于复平面的左半平面,系统在小扰动下是稳定的,对振荡模态进行提取并进行参与因子分析,主要振荡模态及相关状态变量如表 1 所示。

表 1 小信号模型的特征值及参与因子 Table 1 Eigenvalue and participation factor of the small-signal mode			
序号	特征值	振荡频率/Hz	相关状态变量
$\lambda_{7,8}$	$-157.60\pm 49139.00j$	7820.71	$u_{d3}, u_{q3}, i_{d3}, i_{q3}$
$\lambda_{9,10}$	$-157.60\pm 48510.00j$	7720.61	$u_{d3}, u_{q3}, i_{d3}, i_{q3}$
$\lambda_{15,16}$	$-100.08\pm 5544.30j$	882.40	$i_{dc1}, i_{dc2}, u_{dcpv}$
$\lambda_{19,20}$	$-84.08\pm 3297.80j$	524.86	$u_{dc1}, u_{dc2}, i_{dc1}, i_{dc2}$
$\lambda_{21,22}$	$-115.20\pm 3173.60j$	505.09	$i_{pv}, m_{pv}$
$\lambda_{26,27}$	$-251.96\pm 213.68j$	34.01	$x_2, x_4, i_{cq1}$
$\lambda_{29,30}$	$-9.23\pm 242.34j$	38.57	$x_3, i_{cd1}, u_{dc1}, u_{dcpv}, u_{dc2}$
$\lambda_{31,32}$	$-60.01\pm 435.64j$	69.33	$x_{pll1}, \theta_{pll1}, x_{pll3}, \theta_{pll3}$
$\lambda_{33,34}$	$-60.27\pm 434.79j$	69.20	$x_{pll1}, \theta_{pll1}, x_{pll3}, \theta_{pll3}$
$\lambda_{35,36}$	$-60.64\pm 436.10j$	69.40	$x_{pll2}, \theta_{pll2}$
$\lambda_{40,41}$	$-1.92\pm 7.76j$	1.23	$x_9, x_{10}, u_{dc3}$

由表 1 可知,在交直流混合系统两侧不仅含有对应的自振荡模态,同时含有受 VSC1 及混合系统两侧状态变量共同影响的振荡模态 $\lambda_{29,30}$ 。光伏通过互联变换器耦合通道,影响混合系统两侧振荡的传

递与阻尼特性。振荡模态受交直流两侧电力电子设备相互作用的影响。限于篇幅,仅分析互联变换器控制外环等系统参数和控制参数对交直流侧电力电子设备之间交互作用的影响。

## 2.2 交互作用分析模型

如图 6 所示,左右两侧为交直流侧各设备系统模块,中间为交直流两侧系统之间的耦合关系矩阵。AC 母线 1 作为主线路与上级电网相连, VSC2 作为从站灵活控制功率大小及流向实现能源高效利用和功率支援,支撑 VSC1 两侧交直流系统的稳定<sup>[21-22]</sup>。VSC1 功率正向流动时, VSC2 可以看作是直流配电网的一个负载,反向流动时 VSC2 看作直流侧电源,光伏并网逆变器 VSC3 系统将电流以及 PLL 和 Boost、VSC2 输出的电流通过交直流配电网网络传递给互联变换器 VSC1,进而通过 VSC1 实现交直流光伏并网间信息反馈。

图 6 所示的交互作用模型进一步变化等效为图 7 所示的形式,该模型可以清楚地揭示交直流混合配电网中并网逆变器振荡传递过程以及交互影响,可以看出交流侧光伏并网输出电流通过配电网影响直流侧光伏,同时反作用于交流配电网。 $\Delta P_1$  为 AC 母线 1 产生功率波动,  $\Delta P$  为理想电压源输出功率,无穷大电网通过功率补给,可以有效吸收直流侧造成的功率波动,稳定交流配电网母线电压。

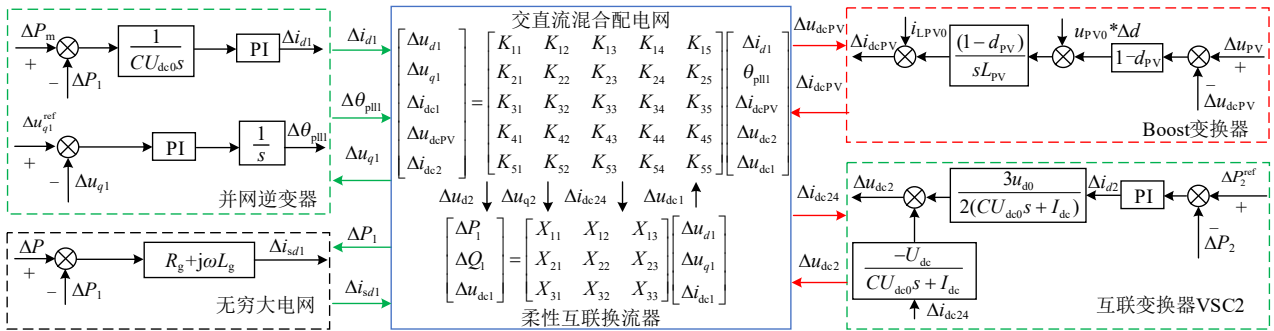


图 6 交直流混合配电系统耦合关系图

Fig. 6 Coupling relationship diagram of AC/DC hybrid distribution system

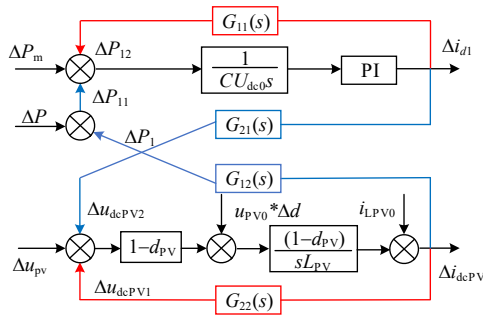


图 7 基于交直流混合配电网下交直流光伏相互作用分析模型

Fig. 7 Analysis model of AC and DC PV interaction in AC and DC hybrid distribution network

图 7 中并网逆变器和 boost 变换器之间的关系可描述为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{11} \\ \Delta u_{dcPV1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(S) & G_{12}(S) \\ G_{21}(S) & G_{22}(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d2} \\ \Delta i_{dcPV} \end{bmatrix} \quad (16)$$

AC 母线 1 功率关系如式(17)所示,因理想电压源作用使得 $\Delta P_{11}$  等于 0,由此重新构建传递函数矩阵方程如式(18)所示。

$$\Delta P_{11} = \Delta P_1 - \Delta P \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta u_{dcPV1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(S) & G_{12}(S) \\ G_{21}(S) & G_{22}(S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d2} \\ \Delta i_{dcPV} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中： $G_{11}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 表示并网逆变器和 boost 对自身稳定性的影响； $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 表示并网逆变器与 Boost 间相互影响； $G_{11}(s)$ 、 $G_{22}(s)$ 、 $G_{12}(s)$ 、 $G_{21}(s)$ 的幅频特性与系统稳态运行点以及各控制环路参数密切相关。第 3 节将基于所建立的交直流混合配电网系统稳定性分析模型，讨论上述因素对系统稳定性的影响。

### 2.3 功率双向传输时互联变换器特性分析

功率处于不同流向时，互联变换器会产生不同的阻抗特性，使得系统产生双向功率稳定性差异。在较高的负荷功率等级下或者弱交流电网下该问题会变的突出<sup>[23]</sup>。现对 VSC1 基于状态空间模型进行三维阻抗建模进行分析，忽略逆变器损耗，根据功率平衡方程，VSC1 交直流两侧之间功率关系可以表示为

$$i_{dc1}u_{dc1} = \frac{3}{2}(u_{d1}i_{d1} + u_{q1}i_{q1}) \quad (19)$$

根据式(3)及对式(19)线性化处理，推导互联变换器小信号空间状态模型可推导为

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{X}}_{VSC1} = \mathbf{A}_{VSC1} \Delta \mathbf{X}_{VSC1} + \mathbf{B}_{VSC1} \Delta \mathbf{i}_{dqdc1} \\ \Delta \mathbf{u}_{dqdc1} = \mathbf{C}_{VSC1} \Delta \mathbf{X}_{VSC1} + \mathbf{D}_{VSC1} \Delta \mathbf{i}_{dqdc1} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $\mathbf{A}_{VSC1}$ 、 $\mathbf{B}_{VSC1}$ 、 $\mathbf{C}_{VSC1}$ 、 $\mathbf{D}_{VSC1}$ 为系数矩阵。对式(20)进行 Laplace 变换，进而  $s$  域内推导  $\Delta \mathbf{u}_{dqdc1}$  与  $\Delta \mathbf{i}_{dqdc1}$  的关系，可得：

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{u}_{dqdc1}(s) = \mathbf{Z}_{VSC1}(s) \Delta \mathbf{i}_{dqdc1} \\ \mathbf{Z}_{VSC1}(s) = \mathbf{C}_{VSC1}(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_{VSC1})^{-1} \mathbf{B}_{VSC1} + \mathbf{D}_{VSC1} \end{cases} \quad (21)$$

换流器三维阻抗模型  $\mathbf{Z}_{VSC}(s)$ 如式(22)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta u_{d1} \\ \Delta u_{q1} \\ \Delta u_{dc1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} & Z_{ddc} \\ Z_{qd} & Z_{qq} & Z_{qdc} \\ Z_{dcd} & Z_{dcq} & Z_{dcdc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{d1} \\ \Delta i_{q1} \\ \Delta i_{dc1} \end{bmatrix} \quad (22)$$

类比于无源互感元件，可将耦合项  $Z_{ddc}$ 、 $Z_{qdc}$ 、 $Z_{dcd}$ 、 $Z_{dcq}$  表示为交流支路和直流支路之间的互感。 $Z_{ddc}$ 、 $Z_{qdc}$  为交流侧对直流侧的影响，而  $Z_{dcd}$ 、 $Z_{dcq}$  表示直流侧对交流侧的影响，交直流间扰动的传递通道由对角耦合项  $Z_{ddc}$ 、 $Z_{qdc}$ 、 $Z_{dcd}$ 、 $Z_{dcq}$  构成<sup>[24-25]</sup>。根据状态空间方程求解耦合量 Bode 图如附录图 A1 所示。由于光伏并网主要输出扰动为交流  $\Delta i_d$  分量，系统稳定分量主要由  $d$  轴分量决定，故主要观察耦合量  $Z_{ddc}$ 、 $Z_{dcd}$ ， $Z_{ddc}$  在功率正向传输时表现为负阻抗特性，在功率反向传输时表现为正阻抗特性，而  $Z_{dcd}$  在功率正反向传输时均表现为负阻抗特性。从而可以证明，功率双向传输时，换流器 VSC1 耦合阻抗特性存在较大差异，因此互联变换器对交互稳定性影响产生双向差异。

## 3 基于交直流光伏单元交互的交直流混合配电网稳定性分析

交直流系统间通过互联变换器进行相互耦合，任意自身以及互联设备的变化都会影响自身以及整个系统的稳定性，本文研究交直流两侧电力电子设备间相互对系统稳定性的影响。根据前文中建立的小信号模型及交互作用模型，分析功率正反向传输时系统参数变化对交互作用及系统稳定性影响。

### 3.1 光伏输出功率对系统稳定性影响分析

分析交直流侧光伏对振荡模态的影响，交直流侧光伏不同的功率输出将改变交直流混合系统的平衡点，从而影响系统的小信号稳定性。在功率正向时控制交流侧光伏输出功率  $P_j$  从 0.025MW 逐渐增加到 0.055MW，如图 8(a)所示，随着输入功率的不断增大，受影响的振荡模态  $\lambda_{7,8}$ 、 $\lambda_{9,10}$  向实轴正半轴偏。控制直流侧光伏输出功率  $P_z$  从 0.03MW 到 0.06MW，如图 8(b)所示，受影响的振荡模态  $\lambda_{19,20}$  向实轴正半轴偏移， $\lambda_{21,22}$ 、 $\lambda_{29,30}$  向实轴负半轴偏移。

功率反向时控制  $P_j$  和  $P_z$  同样变化，如图 8(c)和(d)所示，随着输入功率的不断增大， $P_j$  的增大使振荡模态  $\lambda_{7,8}$ 、 $\lambda_{9,10}$  向实轴正半轴偏移程度减弱，对系统稳定性影响减弱。 $P_z$  的增大使振荡模态  $\lambda_{19,20}$ 、 $\lambda_{21,22}$ 、 $\lambda_{29,30}$  均向实轴负半轴偏移。

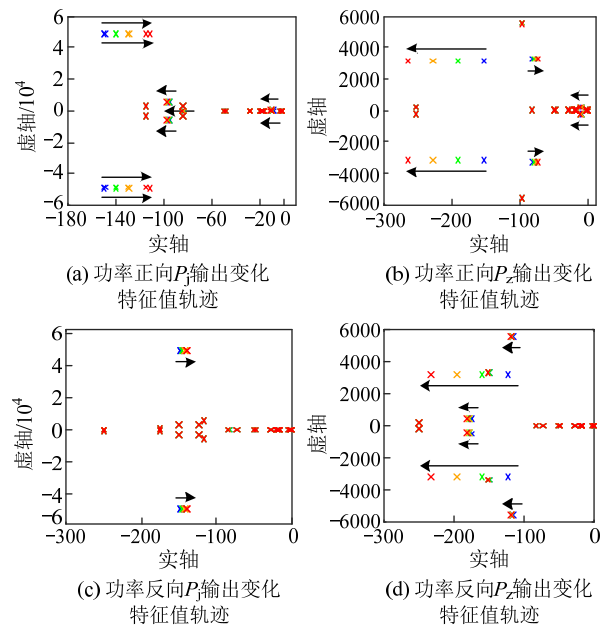


图 8 光伏并网设备输出功率对系统稳定性影响  
Fig. 8 Output power of photovoltaic grid-connected devices impacts the system's stability

对其汇总如附录表 A2 所示，由此可见，光伏输出功率变化仅影响系统的阻尼特性。交流侧光伏输出功率增加会降低并网设备的阻尼，不利于交流系统的稳定，对直流系统的影响程度不变。而直流

侧光伏输出功率的增加则能提升直流系统的阻尼，从而能够抑制交流侧扰动对直流侧的影响。同时，在功率反向流动时，交流侧光伏对交流系统稳定性的负面影响程度也会减弱。

### 3.2 互联变换器电压控制外环的影响

附录图 B1 给出了电压控制外环  $k_{p3}$  变化下，互影响分量伯德图和根轨迹，以及系统的主导模式的参与因子变化趋势。不同电压控制外环  $k_{p3}$  下互影响分量  $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的伯德图如附录图 B1(a) 和 (b) 所示。可见电压外环  $k_{p3}$  影响  $G_{21}(s)$  频率范围为 10Hz~1kHz 级， $G_{12}(s)$  为 1kHz~10kHz 级。随着  $k_{p3}$  增大， $G_{21}(s)$  的幅值增益裕度减小，相位滞后裕度减小， $G_{21}(s)$  相位滞后裕度同样减小，说明交直流间相互作用的稳定裕度减弱。附录图 B1(c) 所示为电压外环  $k_{p3}$  从 0.2pu 增加至 1pu 的特征根轨迹，可见  $k_{p3}$  影响主导振荡模态为  $\lambda_{19,20}$ 、 $\lambda_{29,30}$ 。随着  $k_{p3}$  增加主导振荡特征根  $\lambda_{19,20}$  向正半轴迁移，当达到 1pu 时越过虚轴导致系统失稳，同时振荡频率增加。 $\lambda_{29,30}$  先向左半平面迁移，对系统稳定性有利，随后向右半轴迁移，但是振荡频率一直增加。附录图 B1(d) 和 (f) 所示为主导特征根参与因子轨迹图，随着  $k_{p3}$  增大，特征根  $\lambda_{19,20}$  主导参与因子由原来的  $i_{dc1}$ 、 $i_{dc2}$ 、 $u_{dc2}$ 、 $u_{dc1}$  共同主导，变为  $u_{dc1}$  主导程度逐渐增加，其他参与因子主导程度逐渐降低；特征根  $\lambda_{29,30}$  主导参与因子由原来的  $x_3$  和  $i_{cd1}$  变为仅有  $i_{cd1}$  主导，电压控制外环主导程度大大减弱。可见随着  $k_{p3}$  增大，交流侧光伏会影响交流电网电流质量，进而通过互联变换器影响直流电压电流的稳定，使得交流对直流影响增强，同时直流侧主导参与因子减弱程度，进一步影响系统的稳定。 $k_{p3}$  的增大，使电压控制外环主导减弱，不利于控制其交互影响，降低了系统的稳定。

附录图 B2 给出了功率反向流动时，电压控制外环  $k_{p3}$  变化下互影响分量伯德图和根轨迹变化。互影响分量  $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的伯德图如附录图 B2(a) 和 (b) 所示。 $G_{21}(s)$  与功率正向流动时影响频率范围不同之处在 1kHz 级，在该频率影响范围内随着  $k_{p3}$  增大，互影响分量  $G_{21}(s)$  相位滞后裕度增加，说明交流侧光伏对直流侧光伏作用稳定裕度增强， $G_{21}(s)$  在功率反向流动时，相位裕度极大提高，且为增强趋势，说明功率反向流动对系统稳定性有利。附录图 B2(c) 所示为电压外环  $k_{p3}$  从 0.2pu 增加至 1pu 的特征根轨迹图， $k_{p3}$  影响主导振荡模态为  $\lambda_{15,16}$ 、 $\lambda_{19,20}$ 、 $\lambda_{29,30}$ 。随着  $k_{p3}$  增加，主导振荡特征根均向左半轴迁移，系统稳定性提高。如附录

图 B2(d) 所示， $\lambda_{19,20}$  与功率正向流通时  $i_{dc1}$  占主导程度提高， $u_{dc1}$  主导程度基本不变。可见功率反向传输时，交流侧光伏对系统影响变小，直流侧光伏作为功率汇入设备对交流侧影响增强，随着  $k_{p3}$  增大，直流侧单元主导程度提高有利于控制其交互影响，系统的稳定提高。

### 3.3 互联变换器端口电容的影响

附录图 C1(a) 和 (b) 给出了互联变换器直流侧电容  $C_{dc1}$  变化下  $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的伯德图， $C_{dc1}$  主要影响的交直流间的交互主要体现在 1kHz 级左右，可见随着  $C_{dc1}$  增大，互影响分量  $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的相位滞后增加，交直流间相互作用影响减弱。附录图 C1(c) 所示为  $C_{dc1}$  从 0.09pu 增加至 0.235pu 的特征根轨迹图，可见  $C_{dc1}$  影响主导振荡模态为  $\lambda_{29,30}$ 、 $\lambda_{19,20}$ 、 $\lambda_{15,16}$ ，直流侧振荡影响较大。随着  $C_{dc1}$  增加，主导振荡特征根均向右半轴迁移，系统振荡阻尼减小，但减小幅度较小，对系统稳定性影响不大，同时主导振荡频率特征根均向实轴移动。可以看出  $C_{dc1}$  可以有效地降低高频振荡在交直流间的传递，提高系统的稳定性。如附录图 C2(d)(e) 和 (f) 的参与因子轨迹图所示，随着  $C_{dc1}$  增大，特征值  $\lambda_{29,30}$  的参与因子  $x_3$  和  $u_{dcPV}$  主导程度逐渐增加， $i_{cd1}$  主导程度逐渐降低；特征值  $\lambda_{19,20}$  主导参与因子  $u_{dc1}$ 、 $u_{dc2}$  主导程度逐渐减小，与直流侧光伏有关的  $i_{pv}$  和  $u_{dcPV}$  等参与因子主导程度均有所提高；特征值  $\lambda_{15,16}$  主导参与因子中  $u_{dcPV}$  占很大的主导地位，且随着  $C_{dc1}$  增加有所提高。由此， $C_{dc1}$  可以很好地抑制系统的高频振荡，同时使交直流之间的相互作用影响削弱，直流侧光伏对系统稳定性的影响程度占主导地位且越来越强，系统整体稳定性提高。

附录图 C2(a) 和 (b) 给出了功率反向流动时，互联变换器直流侧电容  $C_{dc1}$  变化下  $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的伯德图， $G_{12}(s)$  的相位裕度极大提高。随着  $C_{dc1}$  增大， $G_{21}(s)$  和  $G_{12}(s)$  的相位滞后裕度逐渐减小，交直流间相互作用增强。附录图 C2(c) 所示为  $C_{dc1}$  从 0.09pu 增加至 0.235pu 的特征根轨迹图，可见  $C_{dc1}$  主导振荡模态与功率正向流动时相同。随着  $C_{dc1}$  增加， $\lambda_{15,16}$ 、 $\lambda_{19,20}$  向负半轴迁移， $\lambda_{29,30}$  依旧向正半轴偏移，但初始阻尼提高， $\lambda_{15,16}$ 、 $\lambda_{19,20}$ 、 $\lambda_{29,30}$  振荡频率均降低。如附录图 C2(d) 所示，与功率正向流动时相比， $\lambda_{29,30}$  主导参与因子  $u_{dcPV}$  所占比重增加。由此， $C_{dc1}$  在功率反向流动时依旧可以很好地抑制系统的高频振荡，交直流之间的相互作用影响增强，直流侧光伏对 VSC1 的影响程度进一步提高，有利于系统的稳定。

### 4 仿真分析

为了验证第 3 节分析所得出的结论的准确性, 根据图 1 所示系统结构图, 在 MATLAB/Simulink 中构建了交直流混合系统仿真模型, 对特征值分析结果进行时域仿真验证。

#### 4.1 交直流光伏输出功率对交互作用的影响

图 9 描述了不同功率流向下, 直流侧光伏并网系统在相同功率输出变化下( $P_z$  以 0.03MW 为初始稳态值、0.5s 时阶跃下降 50%), 直流侧光伏输出电压值以及交流母线功率测试结果。

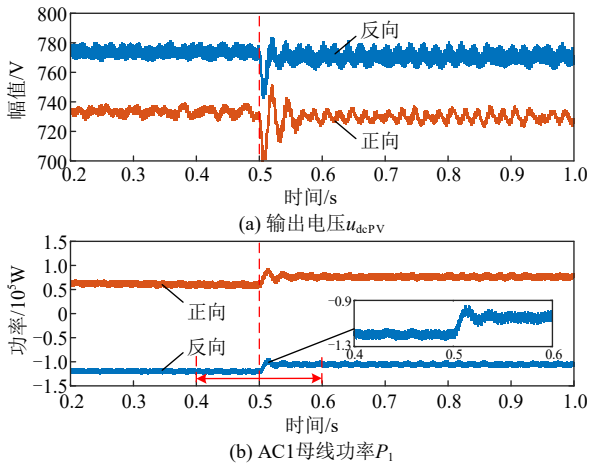


图 9 不同功率流向下  $P_z$  发生变化对系统稳定性影响的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of the impact of changes in  $P_z$  under different power flow directions on system stability

如图 9(a)所示, 当  $P_z$  输出下降时, 功率正反向流动均会使直流输出电压波动加剧, 交流配电网对直流侧光伏影响增强, 同时如图 9(b)所示, AC1 交流母线波动加剧, 交互作用增强。且功率正向流动时影响程度比反向流动时影响较大。

图 10(a)和(b)描述了不同功率流向下交流侧光伏并网系统在相同功率输出变化下( $P_j$  以 0.03MW

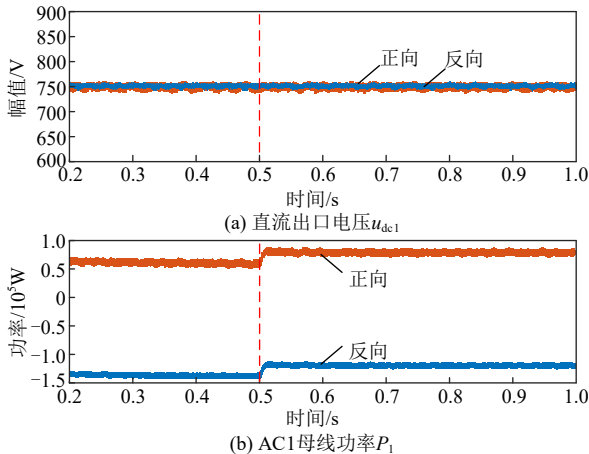


图 10 不同功率流向下  $P_j$  发生变化对系统稳定性影响的仿真结果

Fig. 10 Simulation results of the impact of changes in  $P_j$  under different power flow directions on system stability

为初始稳态值、0.5s 时阶跃下降 50%)直流侧出口电压值和交流侧 AC1 母线功率测试结果。由图 10 可知,  $P_j$  输出改变, 不改变对直流侧的影响, 功率反向流动时, 对直流侧影响减弱。

#### 4.2 VSC1 控制外环 $k_{p3}$ 对交互作用的影响

图 11(a)和(b)描述了功率正向流动时, 设置 0.5s 时交流侧光伏并网, 逆变器 VSC1 电压外环  $k_{p3}$  分别为 0.2、0.6、0.8pu 时, 直流侧光伏出口电压波形以及 AC1 母线功率波形, 光伏在未并网时系统保持稳定, 随着光伏接入,  $k_{p3}$  的增大使系统阻尼降低, 交直流侧振荡幅度增加, 交直流间相互作用增强。

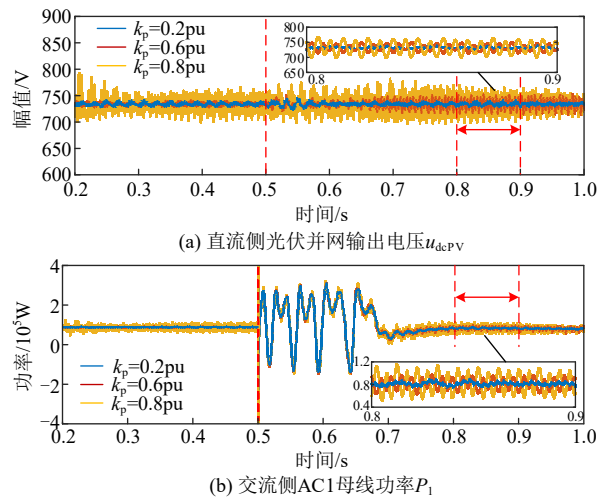


图 11 正向功率流向下  $k_{p3}$  不同值时交直流交互作用的仿真结果

Fig. 11 Simulation results of AC-DC interaction under forward power flow directions and different values of  $k_{p3}$

图 12(a)和(b)为功率反向流动时, 直流侧光伏出口电压波形以及 AC1 母线功率波形。可以看出, 由于 VSC1 的阻抗特性发生变化, 系统阻尼增加, 波形维持不变, 系统保持稳定。

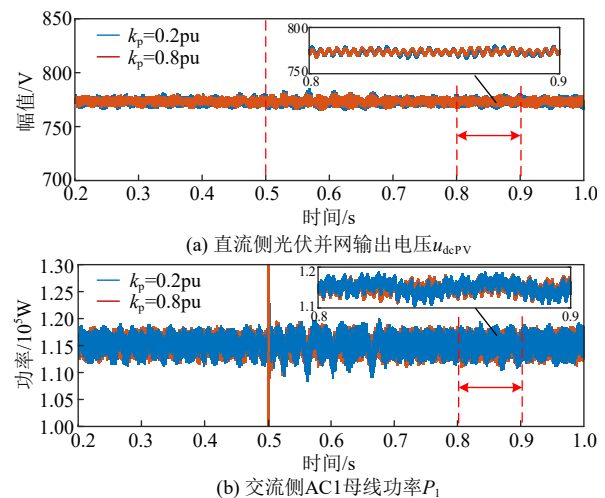


图 12 反向功率流向下  $k_{p3}$  不同值时交直流交互作用的仿真结果

Fig. 12 Simulation results of AC-DC interaction under reverse power flow directions and different values of  $k_{p3}$

### 4.3 VSC1 直流出口电容 $C_{dc1}$ 对交互作用的影响

图 13(a)为功率正向流动时,逆变器 VSC1 直流侧出口电容  $C_{dc1}$  在 0.5s 时,从 0.09pu 分别切换到 0.135 和 0.18pu 的直流侧光伏出口电压波形。随着  $C_{dc1}$  逐渐增大,直流侧振荡程度减弱,交流配电网对直流配电网作用减弱,交直流间交互作用减弱。

图 13(b)和(c)为逆变器 VSC1 控制外环积分  $k_p$  为 0.6pu 时,  $C_{dc1}$  分别为 0.09 和 0.18pu 的直流侧光伏出口电压及 AC 母线 1 功率波形。交流侧光伏在 0.5s 时接入,可以看出当交直流侧交互作用增强时,  $C_{dc1}$  的抑制效果更明显。

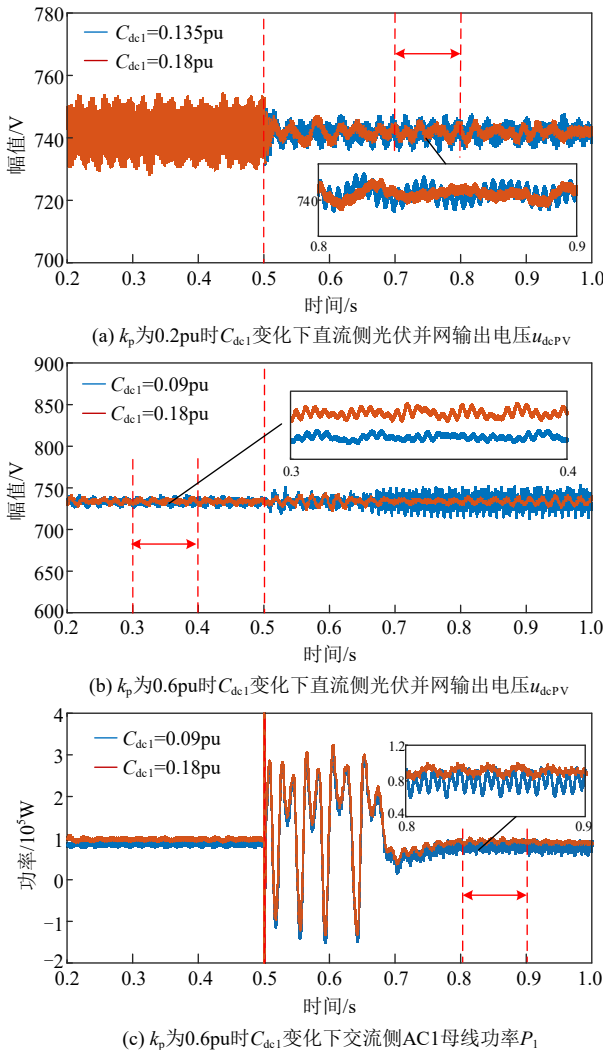


图 13 功率正向流向下  $C_{dc1}$  不同值时交直流交互作用的仿真结果

Fig. 13 Simulation results of AC-DC interaction under forward power flow directions and different values of  $C_{dc1}$

图 14 为功率反向流动且  $C_{dc1}$  在 0.5s 时,从 0.09pu 分别切换到 0.18pu 的直流侧光伏出口电压和逆变器出口电压波形,功率反向流动 VSC1 阻抗特性使系统稳定性增加。随着  $C_{dc1}$  逐渐增大,可以降低 VSC1 直流侧出口电压的振荡幅度,从而抑制其交互作用。

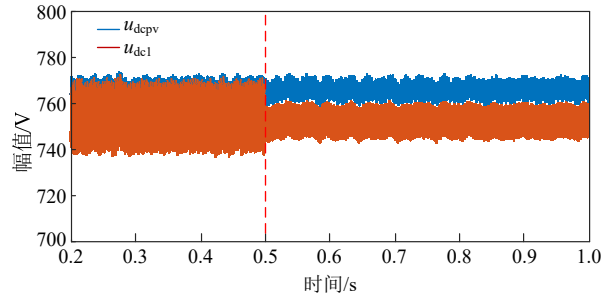


图 14 反向功率流向下  $C_{dc1}$  不同值时交直流交互作用的仿真结果

Fig. 14 Simulation results of AC-DC interaction under reverse power flow directions and different values of  $C_{dc1}$

## 5 结论

本文在交直流混合配电系统中,针对光伏接入导致交直流间产生交互作用,通过对其系统进行稳定性及交互作用分析,得出如下结论,其对分布式光伏多层级接入、功率协调控制等问题具有实际参考意义。

1) 直流侧光伏经 Boost 变换器并入到直流母线中,如自身不发生波动,其可以近似看做恒定电压源,对直流配电网起到稳压的作用,此时可以有效减弱交流侧光伏电流波动对直流配电网的影响,减弱交直流之间的交互作用,直流侧光伏对交流作用增强有利于维持系统的稳定。

2) 互联变换器作为中间设备,影响交直流间动态单元的交互作用,在具有上级电网支撑状态时, VSC1 控制外环积分增大使交直流间交互作用增强,减弱系统的稳定性,而 VSC1 出口电容可以抑制直流侧电压的波动,降低交流侧光伏对直流侧光伏的影响,同时使直流侧光伏主导程度增加,对交直流间交互作用起减弱效果。

3) 互联变换器在不同功率流向对系统稳定性及交直流间交互作用产生差异性,当功率反向流动时系统呈现正阻抗特性,减少振荡,减弱交直流间的交互作用。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

## 参考文献

- 卫志农,裴蕾,陈胜,等.高比例新能源交直流混合配电网优化运行与安全分析研究综述[J].电力自动化设备,2021,41(9):85-94. WEI Zhinong, PEI Lei, CHEN Sheng, et al. Review on optimal operation and safety analysis of AC/DC hybrid distribution network with high proportion of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 85-94(in Chinese).
- 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.电力系统新型振荡问题浅析[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2821-2828. XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. On new oscillation

- issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828(in Chinese).
- [3] 向阳, 秦亮, 谭甜源, 等. 交直流配电网电能质量特性分析与研究进展[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1585-1605.  
XIANG Yang, QIN Liang, TAN Tianyuan, et al. Power quality characteristics analysis and research progress of AC/DC distribution networks[J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1585-1605(in Chinese).
- [4] 邓卫, 裴玮, 吴琦, 等. 低压直流系统 VSC 交互影响与稳定性分析: 主从控制与下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 80-91.  
DENG Wei, PEI Wei, WU Qi, et al. VSC interaction and stability analysis of low-voltage DC system: master-slave control VS droop control[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 80-91(in Chinese).
- [5] 叶伟豪, 郭强, 赵兵, 等. 弱电网下电压源型逆变器多机系统交互影响及失稳机理研究[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4377-4385.  
YE Weihao, GUO Qiang, ZHAO Bing, et al. Study on interaction and instability mechanism of multi-VSC parallel system in weak grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4377-4385(in Chinese).
- [6] MOHAMAD A M I, MOHAMED Y A R I. Investigation and enhancement of stability in grid-connected active DC distribution systems with high penetration level of dynamic loads[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 9170-9190.
- [7] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 动态单元间交互作用对直流微电网稳定性影响的分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7963-7979.  
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on the stability of DC microgrid affected by interactions among dynamic components[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7963-7979(in Chinese).
- [8] 方正, 黄云辉, 严文博, 等. 构网型与跟网型变流器交互作用对并联系统小干扰稳定性的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(2): 134-142.  
FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Influence analysis of interaction between grid-forming and grid-following converters on small interference stability of parallel system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(2): 134-142(in Chinese).
- [9] 陈新, 张旸, 王赞程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4559-4567.  
CHEN Xin, ZHANG Yang, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4559-4567(in Chinese).
- [10] 年珩, 杨军, 陈亮, 等. 交直流混合供电系统直流侧阻抗建模及稳定性分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3477-3487.  
NIAN Heng, YANG Jun, CHEN Liang, et al. DC impedance modeling and stability analysis of AC/DC hybrid power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3477-3487(in Chinese).
- [11] ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Oscillation propagation analysis of hybrid AC/DC grids with high penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4761-4772.
- [12] LI Zhaoyang, HU Haitao, TANG Li, et al. Quantitative severity assessment and sensitivity analysis under uncertainty for harmonic resonance amplification in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 809-818.
- [13] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 考虑频率耦合及交直流端口耦合效应的并网变流器三端口导纳模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 248-259.  
WU Tianhao, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Three-port admittance modeling of grid-connected converters considering frequency-coupling and AC/DC coupling effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 248-259(in Chinese).
- [14] 吴翔宇, 张晓红, 尚子轩, 等. 基于频域阻抗网络建模分析的交直流微电网振荡问题研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2294-2310.  
WU Xiangyu, ZHANG Xiaohong, SHANG Zixuan, et al. Research on the oscillation problem of AC-DC microgrids based on frequency domain impedance network modeling and analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2294-2310(in Chinese).
- [15] 王莹鑫, 徐永海, 陶顺, 等. 交直流混联配电网谐振交互作用分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 74-83.  
WANG Yingxin, XU Yonghai, TAO Shun, et al. Resonance interaction analysis for hybrid AC-DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 74-83(in Chinese).
- [16] 郑凯元, 杜文娟, 王海风. 混联多微电网系统动态交互作用及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5552-5568.  
ZHENG Kaiyuan, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis on dynamic interactions and stability of hybrid multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5552-5568(in Chinese).
- [17] ZHANG Chen, CAI Xu, MOLINAS M, et al. On the impedance modeling and equivalence of AC/DC-side stability analysis of a grid-tied type-IV wind turbine system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(2): 1000-1009.
- [18] PEDRA J, SAINZ L, MONJO L. Three-port small signal admittance-based model of VSCs for studies of multi-terminal HVDC hybrid AC/DC transmission grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 732-743.
- [19] 黄旭程, 何志兴, 伍文华, 等. 交直流微电网中变流器级联系统稳定性分析与协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1432-1442.  
HUANG Xucheng, HE Zhixing, WU Wenhua, et al. Stability analysis of converters cascade system in the hybrid AC/DC microgrid and coordinative control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1432-1442(in Chinese).
- [20] 田艳军, 彭飞, 王毅, 等. AC/DC-DC/AC 级联变流器 DC 与 AC 双侧双向交互稳定性分析及协调优化控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2434-2446.  
TIAN Yanjun, PENG Fei, WANG Yi, et al. Bidirectional interactive stability analysis of DC and AC sides for AC/DC-DC/AC cascade converter and coordinative optimization control[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2434-2446(in Chinese).
- [21] 唐巍, 张起铭, 张璐, 等. 新型配电网多层级交直流互联理念、关键技术与发展方向[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 2-17.  
TANG Wei, ZHANG Qiming, ZHANG Lu, et al. Concept, key

- technologies and development direction of multilevel AC/DC interconnection in new distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 2-17(in Chinese).
- [22] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 含恒功率负载的交直流混联配电系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5572-5582.  
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. Stability analysis of AC/DC hybrid distribution system with constant power loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5572-5582(in Chinese).
- [23] 王垚鑫, 李萌, 年珩, 等. 基于 VSC 的功率双向交直流互联系统直流侧阻抗特性分析及重塑[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7660-7670.  
WANG Yaixin, LI Meng, NIAN Heng, et al. Analysis and reshaping of DC-side impedance characteristic in VSCs-based bidirectional power AC/DC interconnected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7660-7670(in Chinese).
- [24] 宗皓翔, 张琛, 蔡旭. 电力电子主导的交直流混联电网振荡分析与评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3844-3855.  
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, CAI Xu. Oscillation analysis and evaluation of the power electronics-dominated hybrid AC/DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3844-3855(in Chinese).
- [25] LIU Jianing, TAO Xin, YU Miao, et al. Impedance modeling and analysis of three-phase voltage-source converters viewing from DC side[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 3906-3916.



葛津铭

在线出版日期: 2026-01-07。

收稿日期: 2025-05-26。

作者简介:

葛津铭(1990), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为新能源并网运行分析、光学电流测量技术等, E-mail: gejinming90@126.com;

董育玮(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网运行与控制, E-mail: 1443048497@qq.com;

王朝斌(1990), 男, 通信作者, 讲师, 研究方向为新能源并网控制, E-mail: 892042940@qq.com。

(责任编辑 王金芝)

## 附录 A

$$A_{g3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{R_{g3}}{L_{g3}} & \omega \\ 0 & 0 & \omega & -\frac{R_{g3}}{L_{g3}} \end{bmatrix} \quad (A1)$$

$$B_{g3} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{g3}} & 0 & -\frac{1}{L_{g3}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{g3}} & 0 & -\frac{1}{L_{g3}} \end{bmatrix} \quad (A2)$$

表 A1 交直流混合配电系统的具体参数

Table A1 Specific parameters of AC/DC hybrid power distribution system

模块	参数	数值	
交直流传输线路	$R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}/\Omega$	0.015	
	$L_{g1}, L_{g2}, L_{g3}/\text{mH}$	0.0015	
	$R_{14}, R_{24}/\Omega$	0.0189	
	$L_{14}, L_{24}/\text{mH}$	0.0975	
	$R_{pv}/\Omega$	0.0015	
	$L_{pv}/\text{mH}$	0.005	
	$C_{dc34}/10^{-6}\text{F}$	10	
VSC1	$k_{p3}$	0.7	
	$k_{i3}$	200	
	$k_{p4}$	0.7	
	$k_{i4}$	0.001	
	$k_{p1}, k_{p2}$	0.2	
	$k_{i1}, k_{i2}$	10	
	$k_{p\_pll1}$	3200	
	$k_{i\_pll1}$	180	
	$L_{c1}/\text{mH}$	0.5	
	$C_{f1}/10^{-6}\text{F}$	20	
	$C_{dc1}/10^{-6}\text{F}$	1000	
	$u_{dc1}^{ref}/\text{V}$	750	
	$Q_1^{ref}/\text{MW}$	0	
VSC2	$k_{p7}$	0.001	
	$k_{i7}$	0.1	
	$k_{p8}$	0.001	
	$k_{i8}$	0.1	
	$k_{p5}, k_{p6}$	1	
	$k_{i5}, k_{i6}$	20	
	$k_{p\_pll2}$	180	
	$k_{i\_pll2}$	3200	
	$L_{c2}/\text{mH}$	0.5	
	$C_{f2}/10^{-6}\text{F}$	50	
	$C_{dc2}/10^{-6}\text{F}$	1000	
	$P_2^{ref}/\text{MW}$	0.1	
	$Q_2^{ref}/\text{MW}$	0	
交流侧光伏及并网逆变器 VSC3	$k_{p11}$	0.75	
	$k_{i11}$	12	
	$k_{p9}, k_{p10}$	5	
	$k_{i9}, k_{i10}$	20	
	$k_{p\_pll3}$	180	
	$k_{i\_pll3}$	3200	
	$L_{c3}/\text{mH}$	1	
	$C_{f3}/10^{-6}\text{F}$	50	
	$C_{dc3}/10^{-6}\text{F}$	1000	
	$u_{dc3}^{ref}/\text{V}$	900	
	$P_3^{ref}/\text{MW}$	0.025	
	直流侧光伏及 Boost 变换器	$L_{pv}/\text{mH}$	0.0001
		$C_{pv1}/10^{-6}\text{F}$	1000
$C_{pv2}/10^{-6}\text{F}$		1000	
$P_z/\text{MW}$		0.03	

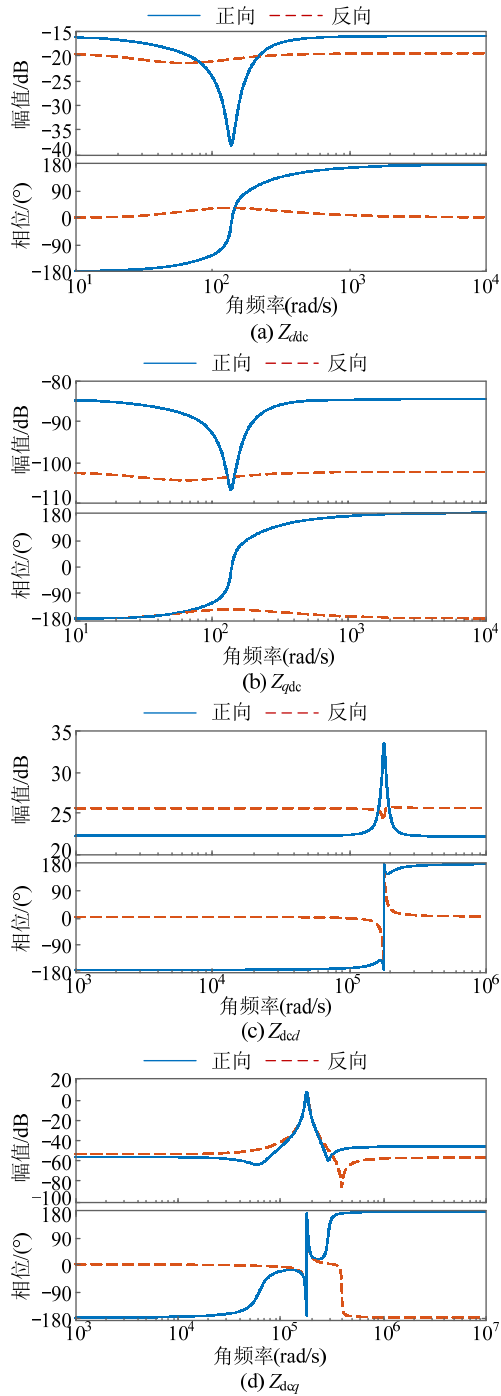


图 A1 VSC1 不同功率流向下阻抗特性图

Fig. A1 Impedance characteristic diagram of VSC1 under different power flow directions

表 A2 交直流光伏输出功率对特征值及阻尼的影响

Table A2 Influence of AC/DC photovoltaic output power on characteristic values and damping

功率流向	光伏功率变化	影响振荡模态	阻尼变化
正向	$P_1$	$\lambda_{7,8}, \lambda_{9,10}$	降低
	$P_2$	$\lambda_{19,20}$	降低
反向	$P_1$	$\lambda_{7,8}, \lambda_{9,10}$	降低
	$P_2$	$\lambda_{19,20}, \lambda_{21,22}, \lambda_{29,30}$	增加

附录 B

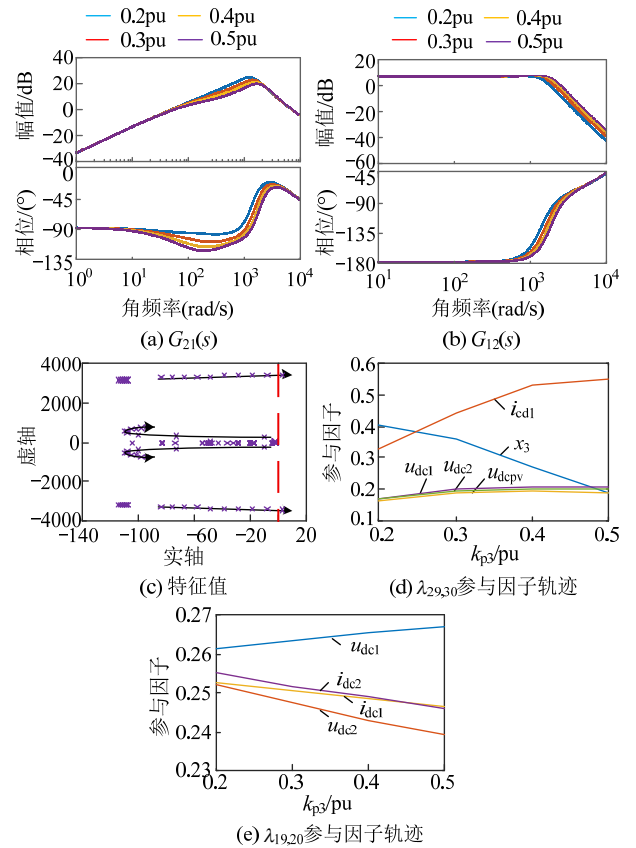


图 B1 功率正向流动时 VSC1 电压外环  $k_{p3}$  变化下系统的稳定性分析

Fig. B1 Stability analysis of the system under the change of the voltage outer loop  $k_{p3}$  of VSC1 when the power flows in the positive direction

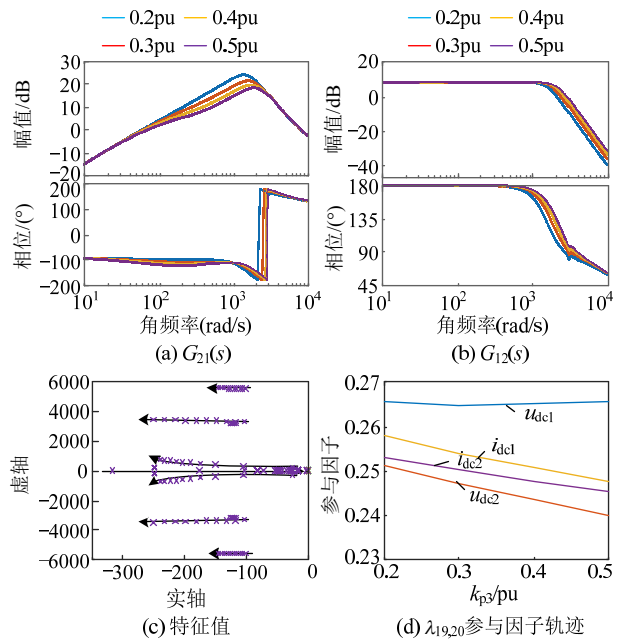


图 B2 功率反向流动时 VSC1 电压外环  $k_{p3}$  变化下系统的稳定性分析

Fig. B2 Stability analysis of the system under the change of the voltage outer loop  $k_{p3}$  of VSC1 when the power flows in the reverse direction

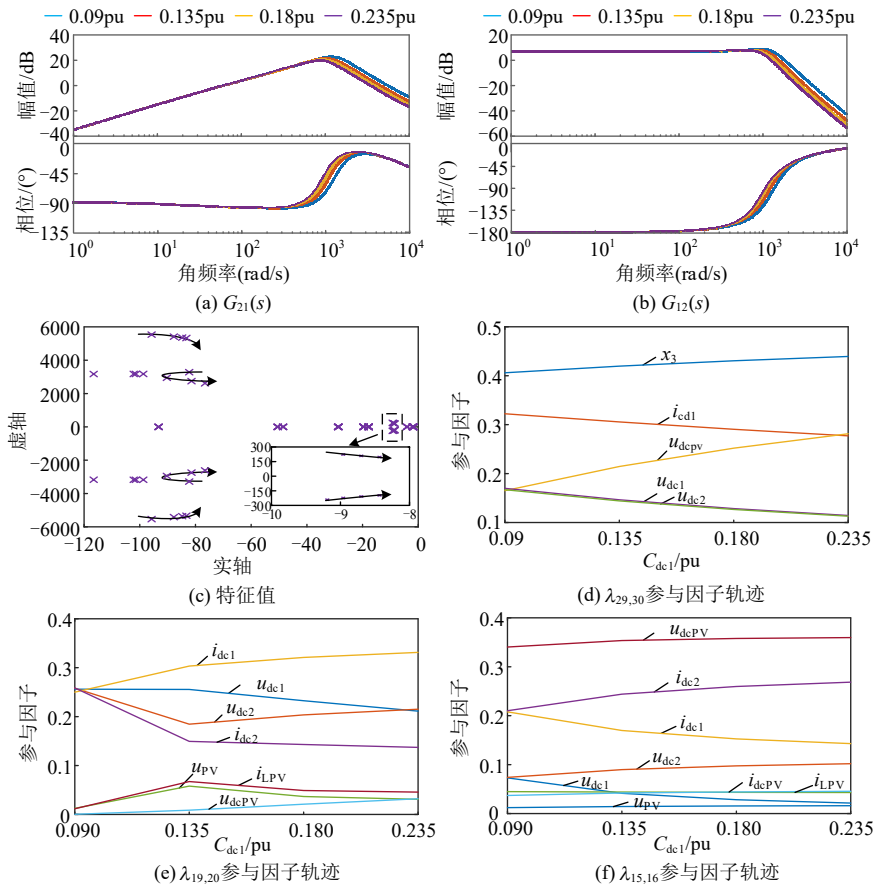


图 C1 功率正向流动时 VSC1 直流侧电容  $C_{dc1}$  变化下系统的稳定性分析  
 Fig. C1 Stability analysis of the system under the change of the DC side capacitor  $C_{dc1}$  of VSC1 when the power flows in the positive direction

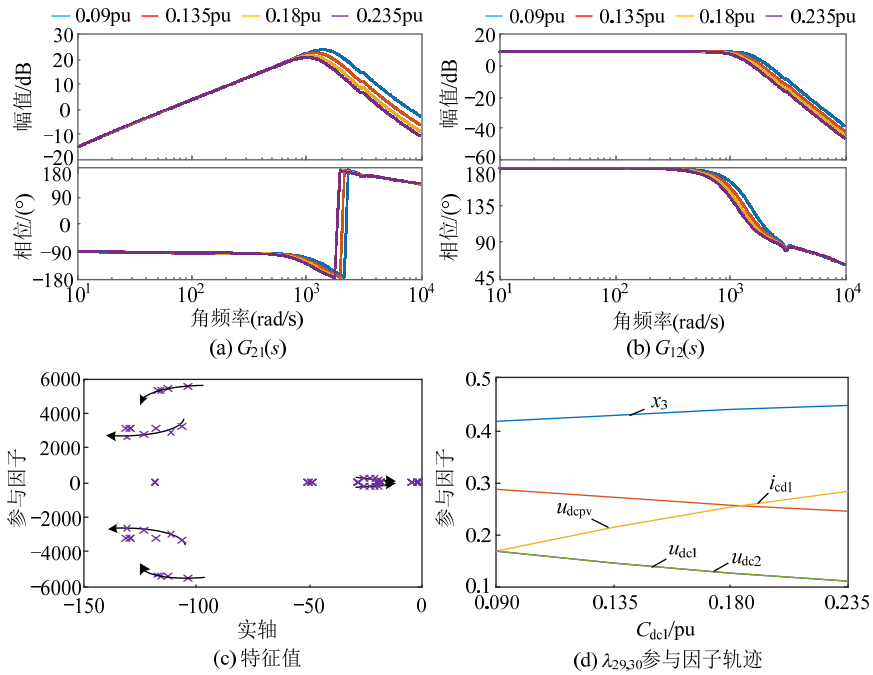


图 C2 功率反向流动时 VSC1 直流侧电容  $C_{dc1}$  变化下系统的稳定性分析  
 Fig. C2 The stability analysis of the system under the change of the DC side capacitor  $C_{dc1}$  of VSC1 when the power flows in the reverse direction