

一种提升背靠背变流器双向功率稳定性的 端口阻抗协同优化控制

彭 飞^{1*}, 田艳军², 陆 歆¹, 马剑勋¹, 孟凡奇¹, 郁清云¹,
马 鑫¹, 魏大洋¹

(1. 国网常州供电公司, 江苏 常州 213000;

2. 华北电力大学 河北省分布式储能与微网重点实验室, 河北 保定 071003)

A Port Impedance Coordinated Optimization Control to Enhance Bidirectional Power Stability for Back-to-Back Converters

PENG Fei^{1*}, TIAN Yanjun², LU Xin¹, MA Jianxun¹, MENG Fanqi¹,
YU Qingyun¹, MA Xin¹, WEI Dayang¹

(1. State Grid Changzhou Power Supply Company, Changzhou 213000, China;

2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: [Objective] AC microgrid back-to-back DC interconnect converters have significant power stability differences between the AC and DC sides in bidirectional power transmission, which may lead to a decrease in system stability and easily cause system instability. [Methods] The impedance characteristics of each port were analyzed through small signal modeling, and the bidirectional power stability of the AC and DC sides of the system was compared and analyzed by combining impedance expressions and Nyquist stability criteria. Aiming at the problems of negative impedance and bidirectional power stability differences under the traditional control, a port impedance coordinated optimization control strategy was proposed to simultaneously optimize the impedance of the three ports in the system. A voltage-power cooperative adjustment mechanism was introduced for the negative impedance on the AC side to achieve adaptive correction of the equivalent impedance characteristics through multivariate dynamic coupling. [Results] A Matlab/Simulink simulation model and a low-power prototype experimental platform were constructed, the simulation and experimental results showed that the proposed

optimization control not only optimized the negative impedance of both the AC and DC sides of the system to the positive impedance, but also reduced the phase difference between the impedances on the DC side to zero, which greatly improved the stability margin of the system and enhanced the system bidirectional power stability. [Conclusion] The proposed port impedance coordinated optimization control strategy can effectively solve the problem of bidirectional power stability differences in back-to-back converter systems.

Key words: microgrid; converter; small signal modeling; stability; optimization control

摘 要: 【目的】交流微网背靠背直流互联变流器在功率双向传输时,交、直流两侧存在明显的功率稳定性差异,这可能导致系统稳定性降低,并易导致系统失稳。【方法】通过小信号建模分析了各端口阻抗的特性,结合阻抗表达式和奈奎斯特稳定性判据,对比分析了系统交、直流侧双向功率稳定性。针对传统控制下存在的负阻抗及双向功率稳定性差异问题,提出了一种端口阻抗协同优化控制策略,同时优化系统内三个端口的阻抗。针对交流侧负阻抗,引入电压-功率协同调节机制,通过多变量动态耦合作用实现等效阻抗特性的自适应矫正。【结果】搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型和低功率原型样机试验平台。仿真和试验结果表明,所提优化控制不仅将系统交、直流两侧的负阻抗均优化为正阻抗,还将直流侧阻抗间相位差降低至零,大大提高系统的稳定裕度,增强系统双

基金项目: 河北省自然科学基金(E2022502032); 国家自然科学基金(51707067)

National Natural Science Foundation of Hebei Province, China (E2022502032); National Natural Science Foundation of China (51707067)

向功率稳定性。【结论】所提端口阻抗协同优化控制策略能有效解决背靠背变流器系统双向功率稳定性差异问题。

关键词: 微网;变流器;小信号建模;稳定;优化控制

0 引言

由分布式电源(Distributed Generator, DG)、发电设备和负荷构成的交流微网,能对日益增长的DG进行消纳^[1-3]。多个交流微网相互连接,有助于提升系统的可靠性与灵活性,同时增强多区域间的能源互补性^[4-6]。在交流互连中,直流互联能够实现功率的双向传输以及PQ控制^[7-10]。

通常采用背靠背变流器,实现交流微网间的直流互联。在变流器中,采用定功率控制时,其直流、交流两侧端口阻抗随功率传输方向变化呈现不同的阻抗特性。当系统处于恒功率负载时,阻抗特性表现为负值^[11-12]。当系统功率值增大,控制器参数、交流电网等值阻抗变动时,易导致系统失稳^[13-14]。

针对多机变流器互联系统的稳定性评估,阻抗建模与稳定性分析具备与特征值建模相似的效果。然而,多机变流器系统能够独立构建模型,建模过程相对简单,具备一定的竞争优势^[15-16]。

基于阻抗建模和稳定性分析方法,文献[17]分析了不同功率方向下变流器直流侧的阻抗特性,提出了一种优化的传统功率控制,将直流电压波动添加到给定功率中,让变流器直流侧负阻抗转变为正阻抗,但该优化仅对单一变流器的控制进行了改良。文献[18]通过对比三种控制模式的差异,证明同时优化两端变流器的控制,对提升系统稳定性效果更优。文献[19-21]提出了一种协调虚拟阻抗控制,将级联系统中背靠背变流器直流侧的负阻抗修正为正阻抗来提升系统稳定性。文献[22]优化了单一变流器的传统功率控制,将交流电压波动反馈到功率中,使变流器交流侧负阻抗转变为正阻抗,该优化虽然能改善功率反向系统稳定性,但会降低功率正向系统稳定性。文献[23]提出了一种只优化功率反向系统稳定性且不影响正向系统稳定性的优化控制。文献[24-25]进一步综合考虑了背靠背变流器系统中直流侧和交流侧的负阻抗问题,提出协同优化控

制,既能解决正向直流侧和反向交流侧的负阻抗问题,又不影响其稳定性,但未考虑两侧变流器间直流侧相位差对系统的影响,且现有交流侧优化策略为单变量修正,在大功率工况下需要显著增大比例系数以实现正阻抗转化,增大了稳态误差。

针对现有文献所面临的挑战,本文提出了一种端口阻抗协同优化(Port Impedance Coordinated Optimization, PICO)控制策略,旨在兼顾将系统交、直流侧负阻抗调整为正阻抗,并消除直流侧端口阻抗间的相位差。首先,阐述了交流微网与背靠背直流互联系统的结构和传统控制方式;其次,通过小信号建模对传统控制下各个端口的阻抗特性进行了深入研究,并结合阻抗匹配理论和奈奎斯特稳定性判据进行稳定性分析。随后,对改善后的端口阻抗进行了小信号建模,对优化后系统交、直流侧功率正反向进行稳定性分析;最终,基于Matlab/Simulink构建系统仿真模型,并搭建低功率原型样机试验平台。通过仿真分析和试验验证,证明了理论分析的准确性和所提优化控制的有效性。

1 交流微网直流互联变流器系统

1.1 系统拓扑及控制结构

交流微网背靠背直流互联变流器系统示意图如图1所示。光伏、风机等新能源发电装置、传统发电机组以及负荷构成的交流微网,通过背靠背变流器(AC/DC-DC/AC)实现直流互联,系统内设备功率实现双向传输。

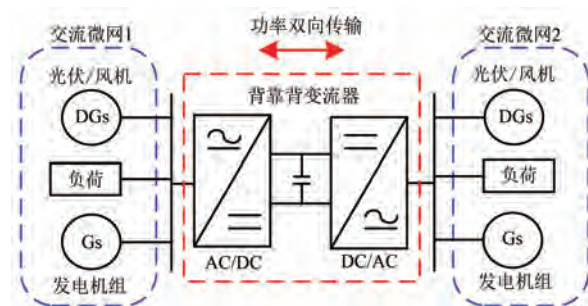


图1 交流微网背靠背直流互联变流器系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of back-to-back DC interconnect converter system for AC microgrid

背靠背变流器拓扑结构如图2(a)所示,传统定直流电压双闭环控制框图和定功率控制框图分别如图2(b)和图2(c)所示。

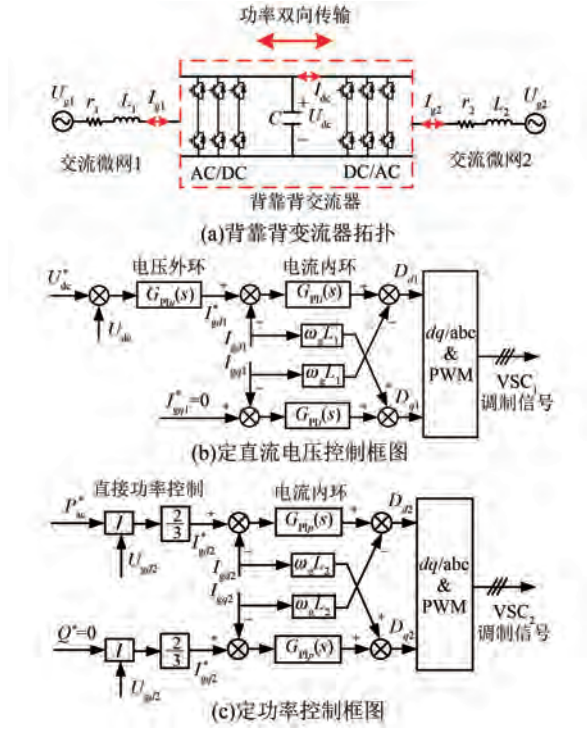


图 2 拓扑和控制框图

Fig. 2 Topology and control block diagram

图 2 中, U_{g1} 、 U_{g2} 分别为交流微网 1、2 的交流电压; I_{g1} 、 I_{g2} 为背靠背变流器两侧交流电流; L_1 、 r_1 和 L_2 、 r_2 分别为 AC/DC 变流器和 DC/AC 变流器交流侧滤波电感、内阻; ω_g 为基波频率; U_{dc} 、 I_{dc} 和 C 分别为直流电压、直流电流和直流电容; P_{ac}^* 为交流侧有功功率给定值; Q^* 为无功功率给定值; I_{gd1} 、 I_{gd1} 和 I_{gd2} 、 I_{gd2} 分别为 AC/DC 变流器和 DC/AC 变流器交流侧 d 、 q 轴电流; U_{gd2} 为 DC/AC 变流器交流侧 d 轴电压; 上标“*”为该变量的给定值; D_{d1} 、 D_{q1} 和 D_{d2} 、 D_{q2} 分别为 AC/DC 变流器和 DC/AC 变流器的 d 、 q 轴占空比; $G_{Piu}(s)$ 和 $G_{Pli}(s)$ 分别为定直流电压控制的电压环和电流环比例积分 (Proportional Integral, PI) 控制器; $G_{Pip}(s)$ 为功率控制电流环的 PI 控制器。 $G_{Piu}(s)$ 、 $G_{Pli}(s)$ 和 $G_{Pip}(s)$ 的表达式分别为

$$G_{Piu}(s) = K_{pu} + K_{iu}/s \quad (1)$$

$$G_{Pli}(s) = K_{pi} + K_{ii}/s \quad (2)$$

$$G_{Pip}(s) = K_{pp} + K_{ip}/s \quad (3)$$

式中: K_{pu} 、 K_{iu} 和 K_{pi} 、 K_{ii} 分别为定直流电压控制的电压环和电流环 PI 控制器的比例、积分系数; K_{pp} 、 K_{ip} 分别为定功率控制电流环 PI 控制器的比例、积分系数。

1.2 传统控制下端口阻抗特性分析

根据参考文献[12-14], 传统控制下背靠背变流器各端口阻抗小信号建模的端口阻抗 Bode 图如图 3 所示。

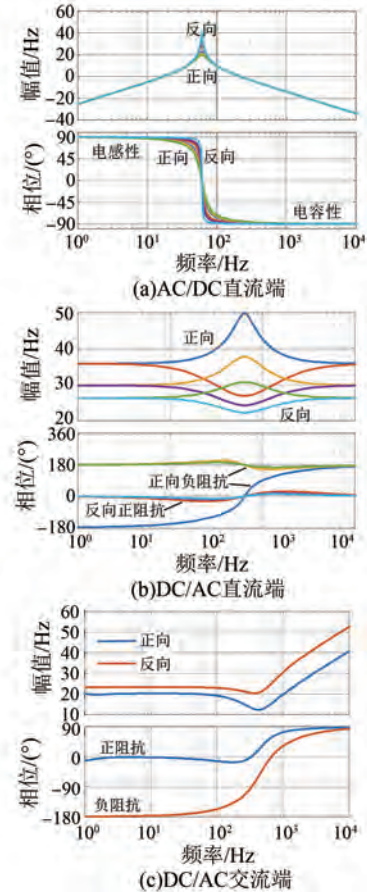


图 3 传统控制下的端口阻抗 Bode 图

Fig. 3 Bode diagram of port impedance under conventional control

由图 3(a) 可知, AC/DC 直流端变流器的直流侧正、反向在低频段均呈现出电感性阻抗。由图 3(b) 可知, DC/AC 直流端变流器的正向阻抗为负, 反向阻抗为正。由图 3(c) 可知, DC/AC 变流器的交流侧正向为正阻抗, 反向为负阻抗。

1.3 传统控制下稳定性分析

依据戴维南定理以及诺顿定理, 利用阻抗匹配原理^[13, 26-28], 直流侧功率正、反向的最小环路比 T_{mDC+} 、 T_{mDC-} 表达式为

$$\begin{cases} T_{mDC+} = \frac{Z_{Adc-out}}{Z_{Bdc-in}} \\ T_{mDC-} = \frac{Z_{Adc-in}}{Z_{Bdc-out}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Z_{\text{Adc-out}}/Z_{\text{Adc-in}}$ 和 $Z_{\text{Bdc-out}}/Z_{\text{Bdc-in}}$ 分别为 AC/DC 变流器和 DC/AC 变流器直流侧输出、输入阻抗。

根据参考文献[12-14],将两侧变流器阻抗表达式代入式(4),可得不同功率等级(1~50 kW)下的优化前功率正、反向的奈奎斯特曲线,如图4所示。

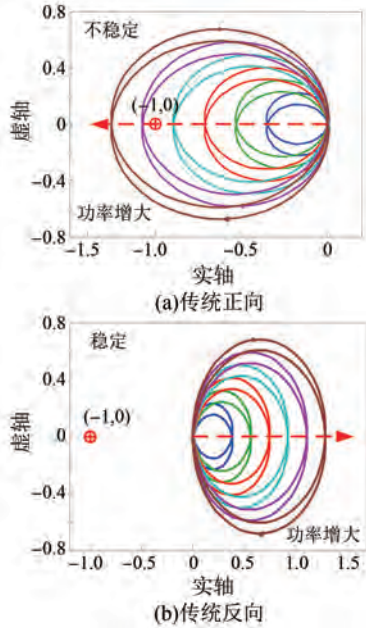


图4 直流侧奈奎斯特曲线

Fig. 4 Nyquist curves on the DC side

根据奈奎斯特稳定判据,由图4可知,当功率增大时,传统控制下直流侧正向曲线顺时针包围点 $(-1, 0)$ 两次,表明此时系统不稳定;由于反向曲线远离点 $(-1, 0)$,表明此时系统稳定。可见直流侧稳定性存在较大差异。

交流微网等效为一个交流电源,阻抗矩阵 Z_g 为

$$Z_g = \begin{bmatrix} L_g s + r_g & -\omega_g L_g \\ \omega_g L_g & L_g s + r_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: L_g, r_g 分别为线路电感、电阻。

在背靠背直流互联变流器交流侧,根据戴维南定理和诺顿定理,定功率控制下的 DC/AC 变流器可等效为电流源换流器,交流微网等效为交流电源。基于阻抗匹配原理,交流侧电功率正、反向最小环路比 $T_{\text{mAC}+}, T_{\text{mAC}-}$ 表达式为

$$\begin{cases} T_{\text{mAC}+} = \frac{Z_{g2}}{Z_{\text{Bdc-out}}} \\ T_{\text{mAC}-} = \frac{Z_{g2}}{Z_{\text{Bdc-in}}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: Z_{g2} 为交流微网2的阻抗。

根据参考文献[12-14],将 DC/AC 变流器交流侧阻抗和交流微网等值阻抗的表达式代入式(6),可得不同功率等级(1~40 kW)下优化前功率正、反向的奈奎斯特曲线,如图5所示。

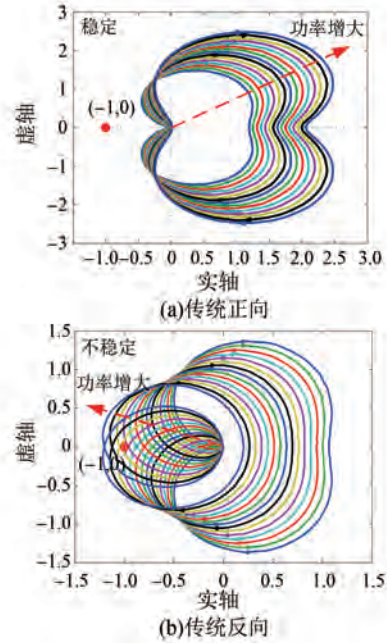


图5 交流侧奈奎斯特曲线

Fig. 5 Nyquist curves on the AC side

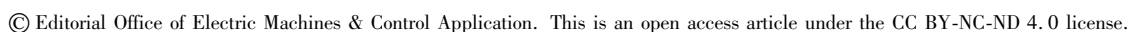
根据奈奎斯特稳定判据,由图5可知,当功率增大时,传统控制下交流侧正向曲线远离点 $(-1, 0)$,表明此时系统稳定;反向曲线包围点 $(-1, 0)$,表明此时系统不稳定。可见交流侧稳定性也存在较大差异。

2 PICO 控制

2.1 PICO 控制原理

因为双向功率传输时系统中 DC/AC 变流器交、直流侧负阻抗会导致系统稳定性降低,直流侧两侧变流器阻抗间相位差也会导致系统稳定性降低^[12],所以本文对上述因素进行综合分析,提出一种 PICO 控制策略,旨在互不影响的情况下,逐一解决每个问题。PICO 控制框图如图6所示。

由图6可知,PICO 系统由三个优化环节组成。优化1环节:首先,将 U_{dc}^* 与 U_{dc} 作差后乘以系数 k_1 ;然后,将得到的数值通过一个功率方向切换模块 DS_1 进行加法操作,将直流电压的变化传递至 P_{ac}^* 中;最后,将 DC/AC 变流器直流侧端口



流设定值扰动量; Δu_{dc} 为直流侧电压扰动量。

将式(13)代入传统控制下的阻抗小信号模型中,可得优化后 Δu_{dc} 到 AC/DC 变流器交流侧电流扰动量 Δi_{gd1} 的逻辑框图如图 8 所示,传递函数 G_{ui1} 为

$$G_{ui1} = \frac{-G_{p1}G_{p1i}U_{dc} + D_{d1}}{-(L_1s + r_1) + G_{p1i}U_{dc}} \quad (14)$$

因此,改进后其端口输出阻抗表达式为

$$Z_{Adc-out} = -\frac{\Delta u_{dc}}{\Delta i_{dc}} = \frac{U_{dc}}{I_{dc} + 2U_{dc}Cs - 1.5U_{gd1}G_{ui1}} \quad (15)$$

式中: Δi_{dc} 为直流侧电流扰动量。

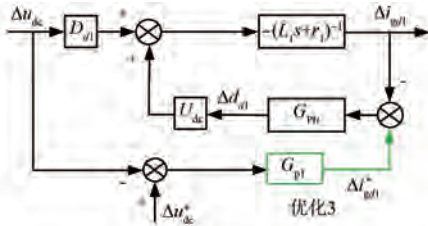


图 8 优化后 AC/DC 变流器直流侧小信号模型

Fig. 8 Small signal model of the DC side of AC/DC converter after optimization

由式(15)可得,PICO 控制下 AC/DC 变流器直流侧正、反向阻抗的 Bode 图,如图 9 所示。

由图 9 可知,PICO 控制成功地将 AC/DC 变流器低频段的电感性阻抗优化为正阻抗,同时超过控制器带宽的高频段仍为电容性阻抗。

DC/AC 变流器直流端建模时,不考虑交流侧的干扰^[13],PICO 控制中优化 1 环节针对 DC/AC 变流器直流端阻抗进行优化,由图 6 可得优化后

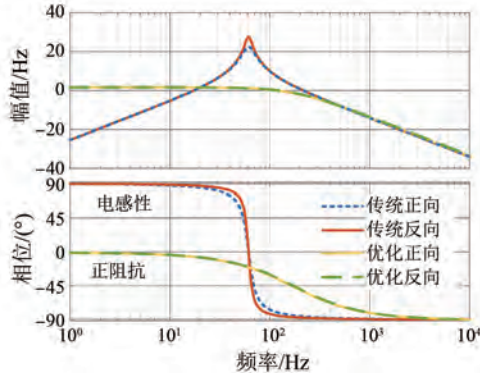


图 9 优化前后 AC/DC 变流器直流侧正、反向阻抗 Bode 图

Fig. 9 Bode plots of positive and negative impedance on DC side of AC/DC converter before and after optimization

的等式为

$$(U_{dc}^* - U_{dc})k_1DS_1 + P_{ac}^* = \frac{3}{2}U_{gd2}I_{gd2}^* \quad (16)$$

对式(16)等号两边同时进行小信号处理,且忽略二次项。然后将其应用到传统控制的阻抗小信号模型中,得到优化后 Δu_{dc} 到 DC/AC 变流器交流侧电流扰动量 Δi_{gd2} 的逻辑框图,如图 10 所示,可得到传递函数为

$$G_{ui2} = \frac{3U_{gd2}D_{d2}s + 2k_1DS_1G_{p1p}U_{dc}}{3U_{gd2}[(L_2s + r_2) + G_{p1p}U_{dc}]} \quad (17)$$

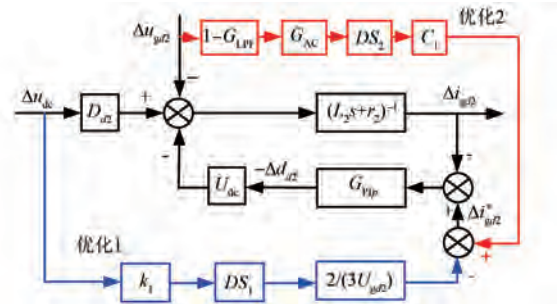


图 10 优化后 DC/AC 变流器直流侧小信号模型

Fig. 10 Small signal model of the DC side of DC/AC converter after optimization

优化后 DC/AC 变流器直流侧阻抗表达式为

$$Z_{Bdc-in} = \frac{U_{dc}}{-I_{dc} + 1.5U_{gd2}G_{ui2}} \quad (18)$$

由式(18)可得,PICO 控制下 DC/AC 变流器直流侧正向和反向阻抗的 Bode 图,如图 11 所示。

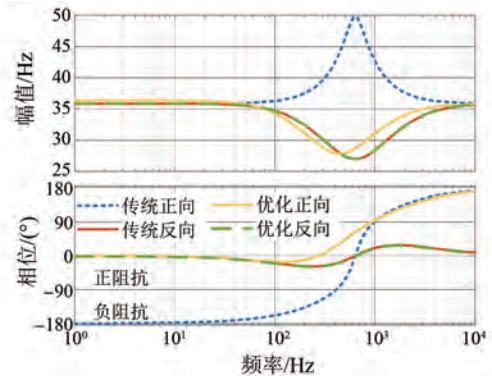


图 11 优化前后 DC/AC 变流器直流侧正、反向阻抗 Bode 图

Fig. 11 Bode plots of positive and negative impedance on DC side of DC/AC converter before and after optimization

由图 11 可知,PICO 控制成功地将 DC/AC 变流器直流低频段负阻抗优化为正阻抗。

DC/AC 变流器交流侧建模时,不考虑直流侧的干扰^[12],PICO 控制中优化 2 环节针对 DC/AC

变流器交流侧阻抗进行优化,由图 6 可得优化后的等式为

$$\Delta u_{gd2} G_{AC} D S_2 + P_{ac}^* = \frac{3}{2} U'_{gd2} I_{gd2}^* \quad (19)$$

将式(11)代入式(19),并对其等号两边同时进行小信号处理,且忽略二次项。然后将其应用到传统控制的阻抗小信号模型中,得到优化后的表达式为

$$\Delta i_{g2}^{*c} = C_1 G_{pq} \Delta u_{g2}^c + C_2 G_2 \Delta u_{g2}^c \quad (20)$$

式中: Δi_{g2}^{*c} 为 dq 坐标系下 DC/AC 变流器交流侧电流给定值矩阵; Δu_{g2}^c 为 dq 坐标系下 DC/AC 变流器交流侧电压矩阵; G_{pq} 为功率矩阵; $C_1 = (-2/3) \times (1/U_{gd2}^2)$ 为常数; $C_2 = (2/3) \times (1/U_{gd2})$ 为常数; G_2 为阻抗优化矩阵,其表达式为

$$G_2 = \begin{bmatrix} \frac{(1 - G_{LPF}) D S_2 G_{AC}}{1 + 2(1 - G_{LPF}) D S_2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

由式(20)得到的优化后的小信号模型如图 12 所示。图 12 中, Δd_2^c 为 dq 坐标系下 DC/AC 变流器 d 轴占空比的扰动量矩阵; Δi_{g2}^{*c} 为 dq 坐标系下 DC/AC 变流器交流侧电流扰动量矩阵; K 为直流电压扰动量对交流侧的影响系数; Z_{op} 为开环阻抗矩阵; G_{id} 为从占空比到并网电流的传递函数矩阵; G_{del} 、 F 分别为延时矩阵、滤波器矩阵; G_{ud} 、 G_{ui} 和 G_{uu} 分别为 abc 三相坐标系下电压到占空比的小信号扰动分量的传递函数矩阵、abc 三相坐标系电压到 dq 坐标系电流的小信号扰动分量的传递函数矩阵和 abc 三相坐标系电压到 dq 坐标系电压的小信号扰动分量的传

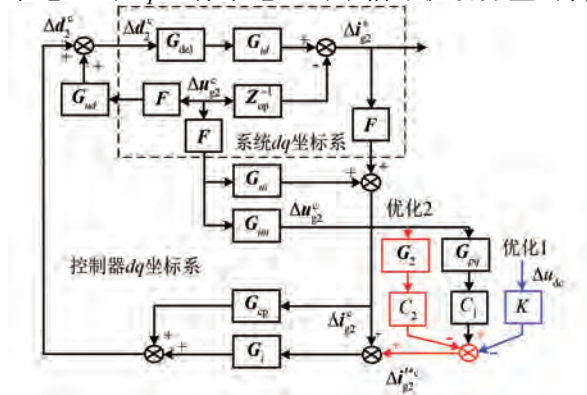


图 12 优化后的 DC/AC 变流器交流侧小信号模型

Fig. 12 Small signal model of the AC side of the DC/AC converter after optimization

递函数矩阵; G_i 为功率控制电流环 PI 控制器矩阵; G_{cp} 为耦合项矩阵。 Z_{op} 、 G_{id} 、 G_{del} 、 G_{ud} 、 G_{ui} 、 G_{uu} 、 F 、 G_i 和 G_{cp} 表达式见附录。

由图 12 可得优化后的阻抗矩阵 $Z_{Bac-out}$ 为

$$Z_{Bac-out} = \{ Z_{op}^{-1} + G_{id} G_{del} [G_{ui} (G_i - G_{cp}) - G_{ud} - (C_1 G_{pq} + C_2 G_2) G_{uu} G_i] F \}^{-1} \cdot [I + G_{id} G_{del} (G_i - G_{cp}) F] \quad (22)$$

由式(19)可得 PICO 控制下 DC/AC 变流器交流侧正、反向阻抗的 Bode 图,如图 13 所示。

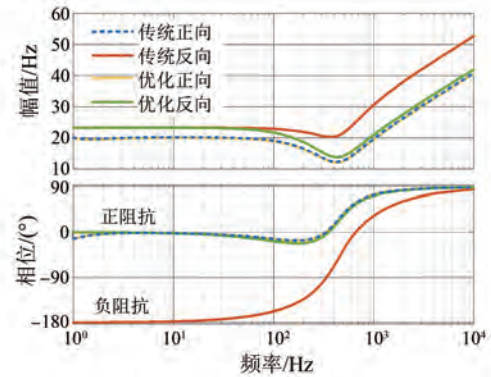


图 13 优化前后 DC/AC 变流器交流侧正、反向阻抗 Bode 图

Fig. 13 Bode plots of positive and negative impedance on AC side of DC/AC converter before and after optimization

由图 13 可知,PICO 控制成功地将 DC/AC 变流器交流侧低频段负阻抗转变为正阻抗。

3 优化后稳定性分析

3.1 直流侧稳定性分析

结合阻抗匹配原理,将式(15)和式(18)代入式(4),可得不同功率等级(1~50 kW)下的优化后功率正、反向奈奎斯特曲线,如图 14 所示。

根据奈奎斯特稳定判据,由图 14 可知,在 PICO 控制下,正反向奈奎斯特曲线均远离点 $(-1,0)$,即系统稳定。相较于传统控制,系统稳定性得到提升。

3.2 交流侧稳定性分析

结合阻抗匹配原理,将式(22)代入式(6),可得不同功率等级(1~40 kW)下优化后功率正、反向奈奎斯特曲线,如图 15 所示。

根据奈奎斯特稳定判据,由图 15 可知,在 PICO 控制下,正、反向奈奎斯特曲线均远离点 $(-1,0)$,即系统稳定。相较于传统控制,PICO 控

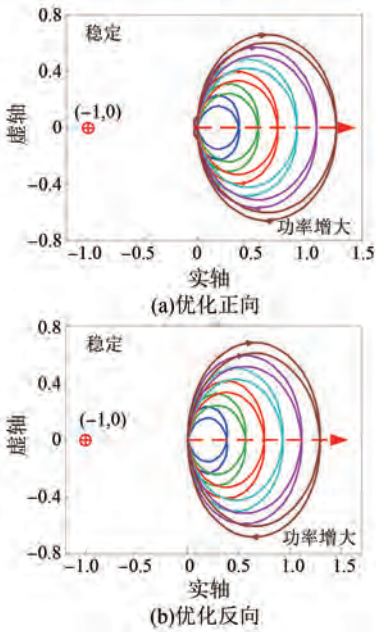


图 14 优化后直流侧奈奎斯特曲线

Fig. 14 Nyquist curves on the DC side after optimization

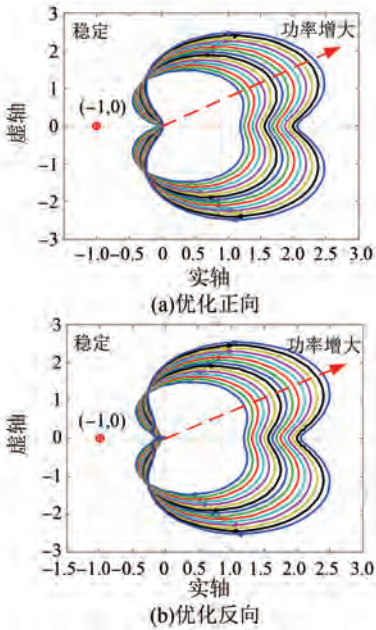


图 15 优化后交流侧奈奎斯特图

Fig. 15 Nyquist curves on the AC side after optimization

制能够显著提升交流侧反向稳定性。

4 仿真及试验验证

4.1 仿真分析

仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流侧电压 U_{dc}/V	800	滤波电感 L/mH	3
电网线电压 U_{gd}/V	380	滤波电感内阻 r_L/Ω	0.1
直流侧电容 $C/\mu F$	400	线路电感 L_g/mH	0.5
基波频率 $\omega_g/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$2\pi\times 50$	线路电阻 r_g/Ω	0.1
开关频率 f_{sw}/kHz	10	无功功率给定值 Q^*/kW	0

仿真工况一设定为功率在 10~−10 kW 之间周期性切换,周期为 0.2 s。仿真结果如图 13 所示。

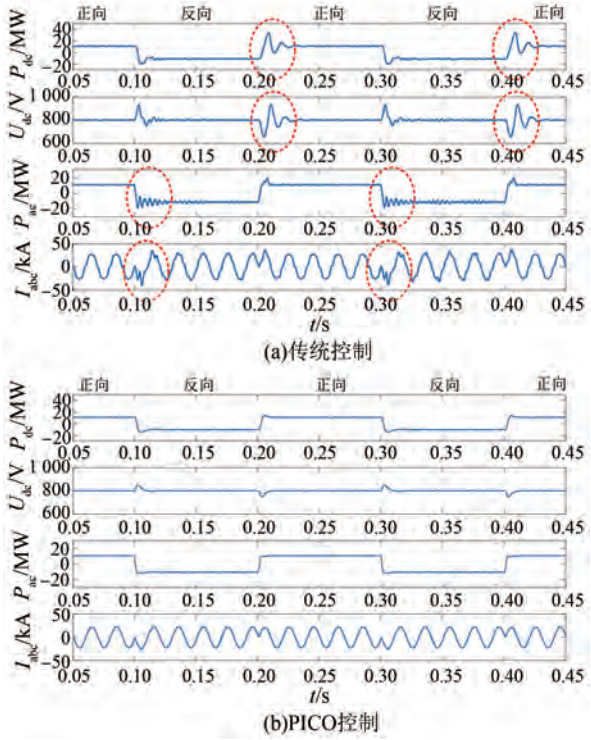


图 16 工况一仿真波形

Fig. 16 Simulated waveforms under operating condition I

由图 16 可知,在传统控制下,尽管系统保持稳定,但直流侧、交流侧功率、直流侧电压和相电流均表现出显著的波动现象。而 PICO 控制下,均未出现明显波动,进一步提升了系统稳定性。

仿真工况二设定为功率在 15~−15 kW 之间周期性切换,周期为 0.2 s;但在 0.2 s 时,将功率分别提升至 30 kW 和 40 kW。仿真结果如图 17 所示。

由图 17 可知,在传统控制下,功率为±15 kW 时,系统运行情况相对稳定,在功率达到 30 kW

时,正向系统虽有一定波动,但一段时间后仍能恢复稳定;反向系统出现失稳,这与反向负阻抗有关。当功率达到 40 kW 时,正向系统也出现失稳,这与正向负阻抗、直流侧相位差等因素有关。

在 PICO 控制下,功率达到 40 kW 时,正反向系统均维持较好的稳定性。仿真结果表明,PICO 控制有效解决了交、直流两端的稳定性问题,与理论分析一致。

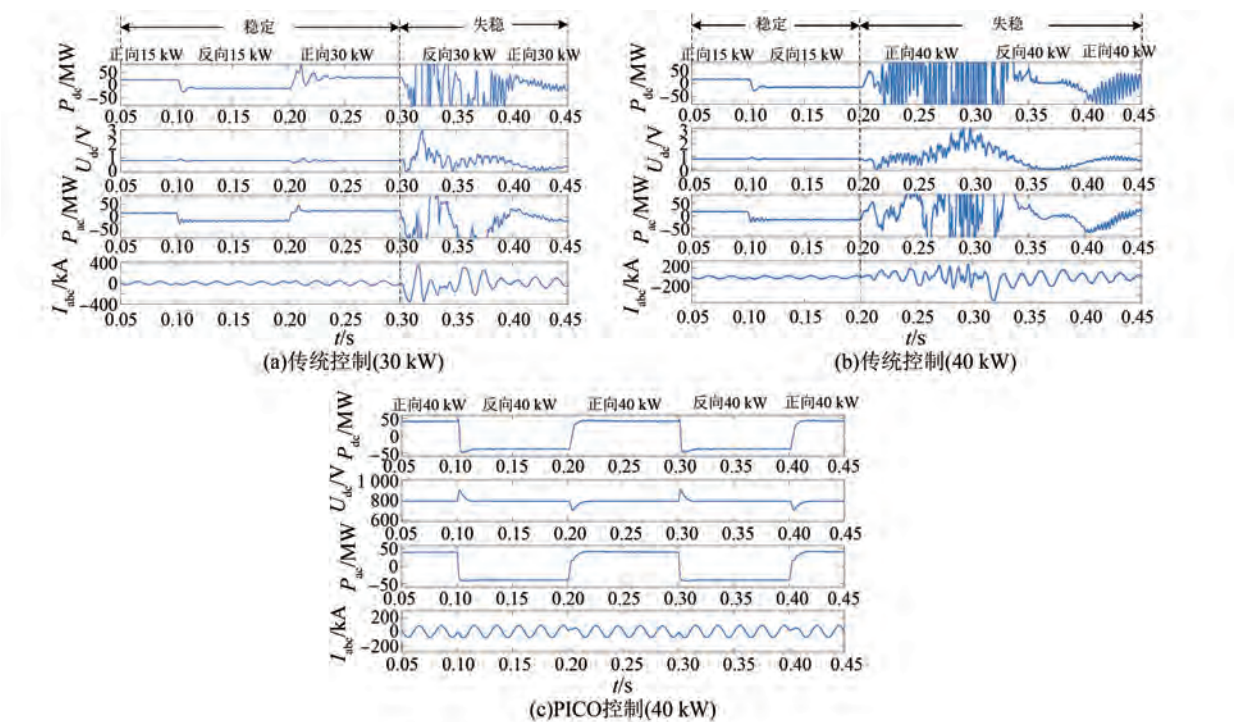


图 17 工况二仿真波形

Fig. 17 Simulated waveforms under operating condition II

4.2 试验验证

为了验证本文所提 PICO 控制的有效性,搭建了一个小型试验平台,如图 18 所示,试验参数如表 2 所示。



图 18 试验平台

Fig. 18 Experimental platform

试验工况一设定为系统直流侧稳定,交流侧功率从 500 W 阶跃至 1 300 W,对比传统控制和 PICO 控制下的功率正反向传输的交流侧有功功率、三相交流电流波形,如图 19 所示。

表 2 试验参数

Tab. 2 Experimental parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流侧电压 U_{dc}/V	400	滤波电感 L/mH	3
基波频率 $\omega_g/(rad \cdot s^{-1})$	$2\pi \times 50$	滤波电感内阻 r_L/Ω	0.1
开关频率 f_{sw}/kHz	10	线路电感 L_g/mH	1.5
直流侧电流 $C/\mu F$	400	线路电阻 r_g/Ω	0.1

由图 19 可知,在传统控制下,功率反向传输时交流功率和电流在阶跃增大时出现短时较大幅度的波动,功率正向时较平稳。在 PICO 控制下,功率正向与反向都不存在较大波动,均能保持较好的稳定性。结果证明了所提 PICO 控制不仅不会降低正向的稳定性,还能大幅度提升反向的稳定性。

试验工况二设定为系统交、直流侧均有扰动,功率等级从 200 W 逐步提升至 1 000 W,对比传统控制和 PICO 控制下的功率正反向传输的直流侧功率、交流侧有功功率、直流侧电压波动和 c 相交流电流波形,如图 20 所示。

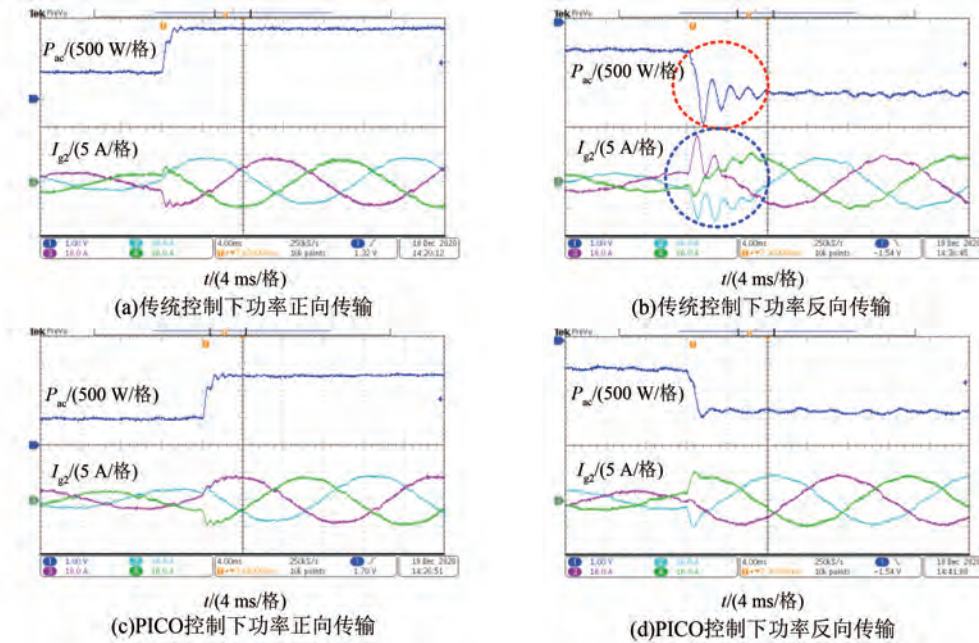


图 19 不同控制下的试验波形(工况一)

Fig. 19 Experimental waveforms under different controls (operating condition I)

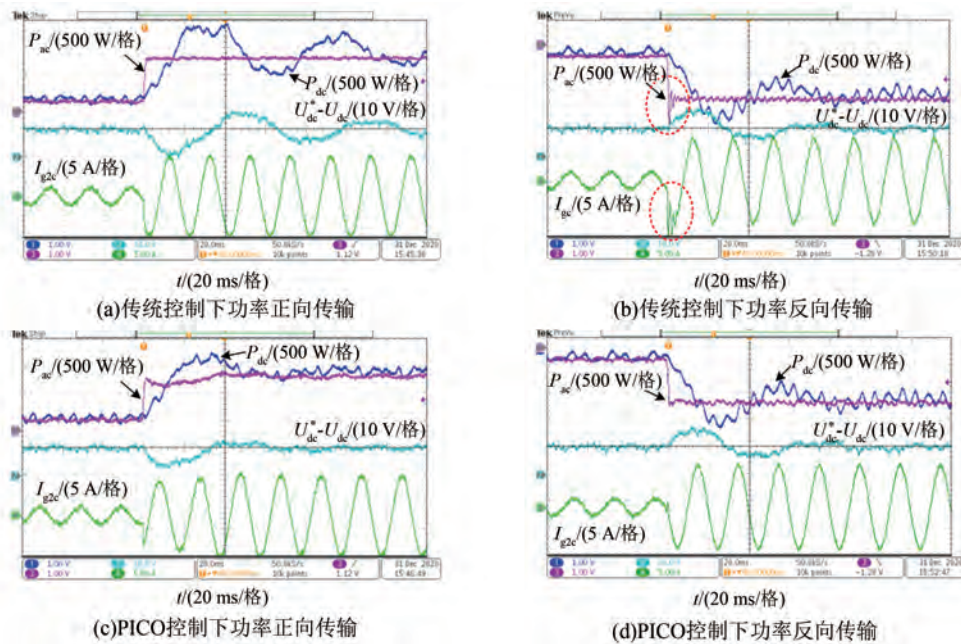


图 20 不同控制下的试验波形(工况二)

Fig. 20 Experimental waveforms under different controls (operating condition II)

由图 20 可知,在传统控制下,功率正向传输时,直流侧电压波动范围较大且持续时间较长;功率反向传输时,交流侧功率和电流的振荡幅度明显比正向大。

在 PICO 控制下,功率正向传输时,直流侧功

率与电压波动范围得到减少,恢复稳定速度更快。功率反向传输时,交流侧有功功率和电流没有明显的振荡现象,切换过程更加平稳。试验结果表明所提 PICO 控制方法有效降低了传统控制过程中的波动性。

5 结语

本文以交流微网背靠背直流互联变流器为研究对象,设计了一种 PICO 控制策略,通过理论分析、仿真和试验得出如下结论。

(1)定功率控制 DC/AC 变流器,其直流和交流侧的负阻抗问题、直流侧端口阻抗间相位差问题都会降低系统稳定性。

(2)PICO 控制同时将各端口阻抗优化为正阻抗,且消除直流侧端口阻抗间相位差,提升系统稳定性。

(3)搭建了 Matlab/Simulink 仿真模型和低功率原型样机试验平台,验证了理论分析的正确性与所提 PICO 控制的有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

彭飞、田艳军进行了方案设计、内容总结与论文撰写,彭飞、孟凡奇和郁清云进行了试验研究,陆歆、马剑勋、马鑫和魏大洋参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Peng Fei and Tian Yanjun. The experimental study was conducted by Peng Fei, Meng Fanqi and Yu Qingyun. The manuscript was reviewed and revised by Lu Xin, Ma Jianxun, Ma Xin, and Wei Dayang. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 郑博文, 杨朋威, 姜传霏, 等. 考虑频率约束的新能源电网极限渗透率估计方法[J]. 广东电力, 2024, 37(10): 66-74.
- ZHENG B W, YANG P W, JIANG C F, et al. Estimation of extreme penetration rate of new energy grid considering frequency constraints [J].

- Guangdong Electric Power, 2024, 37(10): 66-74.
- [2] 李智, 李长喜, 陈创庭, 等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 21-28+34.
- LI Z, LI C X, CHEN C T, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technology of current-control type energy storage converter [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 21-28+34.
- [3] 成杰, 唐小亮, 梁安江, 等. 局部阴影下光伏阵列 MPPT 算法的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 104-109.
- CHENG J, TANG X L, LIANG A J, et al. Research on MPPT algorithm of PV array in partial shadow [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(4): 104-109.
- [4] 孟潇潇, 邵冰冰, 韩平平, 等. 基于背靠背变流器柔性互联的微网群分层协同恢复控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7812-7827.
- MENG X X, SHAO B B, HAN P P, et al. Hierarchical cooperative recovery control strategy for flexible interconnected microgrid cluster based on back-to-back converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7812-7827.
- [5] 咸瑞雪, 韩子娇, 董雁楠, 等. 电压单相跌落下 VSG 输出平衡电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 39-45.
- XIAN R X, HAN Z J, DONG Y N, et al. Virtual synchronous generator output balance current control strategy under single-phase voltage drop [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 39-45.
- [6] 党克, 田勇. 不平衡电压下利用降阶谐振控制器的新型 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(8): 63-67+86.
- DANG K, TIAN Y. VSG control strategy under unbalanced voltage improved by reduced order resonant controller [J]. Electric Machines & Control Applications, 2020, 47(8): 63-67+86.
- [7] 于国星, 宋蕙慧, 侯睿, 等. 柔性直流互联孤岛微网群的分布式频率协同控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 103-111.
- YU G X, SONG H H, HOU R, et al. Distributed cooperative frequency control for flexible DC interconnected island microgrid cluster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44

- (20): 103-111.
- [8] 范广胜, 朱琳, 封洋燚, 等. 交直流混合微电网并网接口变换器的 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 68-74+80.
- FAN G S, ZHU L, FENG Y Y, et al. VSG control strategy of AC/DC hybrid microgrid parallel interfacing converter [J]. Electric Machines & Control Applications, 2021, 48(3): 68-74+80.
- [9] 余巧, 张巧杰, 李云侠. 一种提高无功分配精度的下垂控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(2): 86-90.
- YU Q, ZHANG Q J, LI Y X. A droop control strategy for improving the sharing accuracy of reactive power [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(2): 86-90.
- [10] 党克, 田勇. 基于电网电压前馈的 VSG 平衡电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 35-40.
- DANG K, TIAN Y. VSG balanced current control strategy based on grid voltage feedforward [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(1): 35-40.
- [11] AMIN M, MOLINAS M, LYU J, et al. Impact of power flow direction on the stability of VSC-HVDC seen from the impedance Nyquist plot [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8204-8217.
- [12] WEN B, BURGOS R, BOROYEVICH D, et al. AC stability analysis and dq frame impedance specification in power electronics based distributed power systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1455-1465.
- [13] 蔡海青, 郭琦, 杨仁炘, 等. 用于弱电网互联的柔性直流输电系统双端构网型控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 202-209.
- CAI H Q, GUO Q, YANG R X, et al. Dual-end grid-forming control of flexible DC transmission system for weak grid interconnection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 202-209.
- [14] 姜玉霞, 田艳军, 李永刚. 有功功率载荷波动对分布式发电并网逆变器稳定影响分析及其改进控制策略[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 646-654.
- JIANG Y X, TIAN Y J, LI Y G. Analysis of the influence of active power load fluctuation on the stability of distributed generation grid-connected inverter and improved control strategy [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 646-654.
- [15] 刘垚, 孔力, 邓卫, 等. 交直流混联系统稳定性分析研究综述[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(9): 36-47.
- LIU Y, KONG L, DENG W, et al. Review of stability analysis for AC/DC hybrid power systems [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(9): 36-47.
- [16] 刘欣, 郭志博, 贾焦心, 等. 多变流器并网系统的 SISO dq 阻抗稳定性判据及闭环极点灵敏度分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(11): 3427-3445.
- LIU X, GUO Z B, JIA J X, et al. SISO dq impedance stability criterion and closed-loop pole sensitivity analysis of multi-converter grid-connected system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(11): 3427-3445.
- [17] TIAN Y J, LOH P C, DENG F J, et al. Impedance coordinative control for cascaded converter in bidirectional application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4084-4095.
- [18] 林原, 张建浩, 徐岩. 微网互联系统中背靠背变流器协调阻抗优化控制[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 24-31.
- LIN Y, ZHANG J H, XU Y. Coordinative impedance optimized control for back-to-back converter in microgrid interconnection system [J]. Journal of North China Electric Power University, 2021, 48(6): 24-31.
- [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): 1432-1443.
- HUANG X C, HE Z X, WU W H, 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): 1432-1443.
- [20] TIAN Y J, P F, WANG Y, et al. Coordinative impedance damping control for back-to-back converter in solar power integration system [J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(9): 1484-1492.
- [21] TIAN Y J, CHEN Z, DENG F J, et al. Active power and DC voltage coordinative control for cascaded DC-AC converter with bidirectional power application

- [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5911-5925.
- [22] 田艳军, 彭飞, 王毅, 等. DC/AC 并网变流器系统功率双向流动下稳定性差异分析与功率补偿控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3303-3316.
TIAN Y J, P F, WANG Y. Stability difference analysis and power compensation control for DC/AC grid-connected converter system under bidirectional power flow [J]. High voltage Engineering, 2021, 47(9): 3303-3316.
- [23] 田艳军, 彭飞, 王慧, 等. 输电系统中并网变流器优化双向功率稳定性差异的阻抗控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3734-3742.
TIAN Y J, PENG F, WANG H, et al. Impedance control strategy for optimizing bidirectional power stability difference of grid-connected converters in transmission system [J]. High voltage Engineering, 2020, 46(11): 3734-3742.
- [24] 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): 2434-2449.
TIAN Y J, PENG F, WANG Y, 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): 2434-2449.
- [25] 田艳军, 王坤, 彭飞, 等. 交流配电网中柔性直流互联装置阻抗稳定性分析及阻抗协同重塑控制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 43-49.
TIAN Y J, WANG K, PENG F. Analysis of impedance stability for flexible DC interconnection device in AC distribution network and impedance coordinated reshaping control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 43-49.
- [26] 王海鑫, 刘铭崎, 董鹤楠, 等. 含高比例新能源的电力系统低频振荡分析与抑制综述[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 152-163.
WANG H X, LIU M Q, DONG H N, et al. Review on analysis and suppression of low-frequency oscillation in power system with high penetration of renewable energy sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 152-163.
- [27] 姜惠兰, 肖瑞. 提高系统暂态稳定性的 VSC-HVDC 有功无功联合附加控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 138-144.
JIANG H L, XIAO R. Combined active and reactive additional control strategy of VSC-HVDC for improving system transient stability [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 138-144.
- [28] 付媛, 张保泽, 张祥宇, 等. 虚拟同步耦合下储能的频率支撑与功率振荡多目标协调控制[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 1-9+23.
FU Y, ZHANG B Z, ZHANG X Y, et al. Multi objective coordinated control of frequency support and power oscillation for energy storage under virtual synchronous coupling [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 1-9+23.
- [29] 杨帆, 曹九宙, 叶灵玥, 等. 基于增量成本的交流混合微电网分级分布式控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(18): 199-207.
YANG F, CAO J Z, YE L Y, et al. Incremental cost based hierarchical distributed control strategy for AC/DC hybrid microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(18): 199-207.
- [30] 莫必祥, 伍文华, 陈燕东, 等. 抑制直驱风电并网系统次/超同步振荡的储能变流器有源阻尼控制方法[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2380-2391.
MO B X, WU W H, CHEN Y D, et al. Active damping control method for power conversion system to suppress sub-/super-synchronous oscillation of D-PMSG grid-connected system [J]. Power System Technology, 2023, 47(6): 2380-2391.

收稿日期:2025-03-16

收到修改稿日期:2025-05-15

作者简介:

彭 飞(1996-),男,硕士,工程师,研究方向为变流器阻抗建模及稳定性分析,Dqpengfei@126.com;

*通信作者:彭 飞(1996-),男,硕士,工程师,研究方向为变流器阻抗建模及稳定性分析,Dqpengfei@126.com。

附录

传递函数矩阵 $\mathbf{Z}_{\text{op}}$ 、 $\mathbf{G}_{id}$ 、 $\mathbf{G}_{uu}$ 、 $\mathbf{G}_{ui}$ 、 $\mathbf{G}_{ud}$ 、 $\mathbf{G}_i$ 、 $\mathbf{G}_{\text{cp}}$ 、 $\mathbf{G}_{\text{del}}$ 和 $\mathbf{F}$ 的表达式分别为

$$\mathbf{Z}_{\text{op}} = \begin{bmatrix} -(Ls + r_L) & -\omega_g L \\ \omega_g L & -(Ls + r_L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_{id} = \frac{-U_{\text{dc}}}{(Ls + r_L)^2 + (\omega_g L)^2} \begin{bmatrix} Ls + r_L & \omega_g L \\ -\omega_g L & L_2 s + r_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{G}_{uu} = \begin{bmatrix} 1 & U_{\text{gq2}} H_{\text{PLL}} \\ 0 & 1 - U_{\text{gd2}} H_{\text{PLL}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: H_{PLL} 为锁相环的传递函数表达式。

$$\mathbf{G}_{ui} = \begin{bmatrix} 0 & I_{\text{gq2}} H_{\text{PLL}} \\ 0 & -I_{\text{gd2}} H_{\text{PLL}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_{ud} = \begin{bmatrix} 0 & -D_{\text{q2}} H_{\text{PLL}} \\ 0 & D_{\text{d2}} H_{\text{PLL}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} K_{\text{pi}} + \frac{K_{\text{ii}}}{s} & 0 \\ 0 & K_{\text{pi}} + \frac{K_{\text{ii}}}{s} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{G}_{\text{cp}} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{2\omega_g L}{U_{\text{dc}}} \\ \frac{2\omega_g L}{U_{\text{dc}}} & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{G}_{\text{del}} = \begin{bmatrix} \frac{1 - 0.5T_{\text{del}}s}{1 + 0.5T_{\text{del}}s} & 0 \\ 0 & \frac{1 - 0.5T_{\text{del}}s}{1 + 0.5T_{\text{del}}s} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: T_{del} 为延时系数。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} & 0 \\ 0 & \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$