第 52 卷 第 5 期：2409-2420 高电压技术 Vol.52, No.5: 2409-2420
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241879

考虑电网强度对直流母线稳定性影响的并网变流器控制参数优化设计

张权宝[1]，唐　芬[1]，梁建钢[2]，陈　宁[2]，吴学智[1]，孙维康[1]
（1. 国家能源主动配电网技术研发中心(北京交通大学)，北京 100044;
2. 北京晟运能源科技有限公司，北京 101320）

摘　要：直流微电网和交流电网通过并网变流器(grid connected converter，GCC)连接，随着交流电网强度的降低，基于理想电网设计的 GCC 控制参数可能导致直流母线失稳。为了解决该问题，提出了一种考虑电网强度影响的 GCC 控制参数优化设计方法。首先建立了考虑电网强度对直流母线稳定性影响的 GCC 直流侧阻抗模型，定量分析了 GCC 主要控制参数对系统主导极点的影响及灵敏度，揭示了不同控制参数在电网强度改变时对直流侧稳定性影响程度存在显著差异。在此基础上，提出了兼顾动稳态特性和低电网强度下直流侧稳定性的高灵敏度参数图形化优化设计方法，并给出了参数设计流程图。最后通过仿真和实验，验证了阻抗模型、稳定性分析和控制参数优化设计的正确性。研究结果表明：所提参数设计方法能够在兼顾 GCC 动态和稳态特性的基础上，有效提升低电网强度下直流母线的稳定性，为不同电网强度下的 GCC 设计提供指导。

关键词：并网变流器；电网强度；直流母线稳定性；直流侧阻抗建模；控制参数优化设计；参数灵敏度

Optimization Design of Control Parameters for Grid Connected Converter Considering the Impact of Grid Strength on DC Bus Stability

ZHANG Quanbao[1], TANG Fen[1], LIANG Jiangang[2], CHEN Ning[2], WU Xuezhi[1], SUN Weikang[1]
(1. National Active Distribution Network Technology Research Center (Beijing Jiaotong University), Beijing 100044, China;
2. Beijing Shengyun Energy Technology Co., Ltd., Beijing 101320, China)

Abstract：DC microgrid and AC grid are connected through a grid connected converter (GCC). As the strength of the AC grid decreases, GCC control parameters designed for an ideal grid may induce DC bus instability. To address this issue, a control parameter optimization design method for GCC considering the influence of grid strength is proposed. Firstly, a GCC DC side impedance model considering the impact of grid strength on DC bus stability is developed. A quantitative analysis is performed to evaluate the effects of GCC control parameters on system dominant poles and their sensitivity to DC-side stability under varying grid strengths, revealing significant differences in the impact of different parameters on stability when grid strength changes. On this basis, a graphical optimization design method for high-sensitivity parameters that considers both dynamic and steady-state characteristics as well as DC side stability under low grid strength is proposed, and a parameter design flowchart is provided. Finally, the correctness of the impedance model, stability analysis, and control parameter optimization design are verified through simulation and experiments. Research results demonstrate that the proposed parameter design method can be adopted to effectively enhance DC bus stability under low grid strength while maintaining good dynamic and steady-state characteristics of the GCC, providing guidance for GCC design under different power grid strengths.

Key words：grid connected converter; grid strength; DC bus stability; DC side impedance modeling; optimization design of control parameters; parameter sensitivity

0　引言

并网变流器(grid connected converter，GCC)作为直流微电网与交流电网接口，广泛应用于低碳工业园区和商业楼宇等场合[1-3]。随着直流微电网中接入的可再生能源及电力电子设备日益增多，微电网呈现出典型的恒功率和负阻尼特征，当电网阻抗增加时，电网强度变弱，基于理想电网设计的 GCC 控制参数可能导致直流母线存在失稳风险。因此，

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFC3807000)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFC3807000).

考虑电网强度对直流母线稳定性影响的 GCC 控制参数优化设计研究具有重要意义。

含并网变流器系统的稳定性研究通常采用 3 种方法：状态空间法[4]、电动力法[5-6]和阻抗分析法[7-9]，其中阻抗分析法直观易用，在工程实践中获得了广泛应用。现有考虑电网强度的研究主要集中在弱电网对交流侧稳定性的影响方面，文献[8-9]揭示了锁相环(phase-locked loop，PLL)对并网变流器交流侧阻抗特性的影响，指出由于 PLL 带宽内存在负阻尼效应，因此易与电网阻抗交互引发交流侧失稳。但以上研究通常将直流侧视为理想电源，难以反映直流失稳风险。在并网变流器对直流侧稳定性研究方面，文献[10]建立了单相变流器级联双有源变换器的直流侧阻抗模型，对比了功率正反向流动带来的直流侧稳定性差异；文献[11]建立了三相两电平并网变流器的直流侧阻抗模型，研究了考虑直流线路阻抗的系统稳定性，但均未考虑交流电网强度对直流侧稳定性的影响。文献[12]考虑了 PLL 环节对并网变流器直流端口阻抗特性的影响。在此基础上，文献[13]推导了不同电网强度影响下的并网变流器直流端口特性，指出电网强度降低会导致并网变流器直流输出端口的谐振峰增大，进而容易引发直流母线振荡。

为了规避并网变流器直流侧稳定性风险，文献[14]利用非线性控制器代替现有比例积分(proportional-integral，PI)控制，但复杂的控制结构和较大的计算量在实际应用中存在一定限制。文献[15]提出附加阻尼控制，结合不同功率传输方向分析，提出基于 2 阶微分环节的直流电压前馈控制，实现了振荡抑制。文献[16]引入了直流侧电流前馈环节，优化输出阻抗，从而提升系统稳定性。但上述研究仅针对理想电网工况，且可能引入新的振荡风险。在优化控制参数方面，文献[17]基于背靠背变流器场景，在理想电网下明确了电压外环 PI 参数的整定趋势。文献[18]基于较低电网强度工况，指出 PLL 参数设计不当时，可能导致直流侧失稳。文献[19]考虑了不同电网强度对直流母线稳定性的影响，指出不同电网强度下 PLL 带宽大小的变化对直流电压控制稳定性的影响不同，当电网强度较低时，直流电压控制带宽应大于 PLL 带宽，但文中没有给出明确的参数优化范围和区间。文献[20]考虑低电网强度，基于阻抗分析法，得到了并网变流器电流内环比例系数增大和电压外环比例系数增大有利于减弱直流输出谐振峰。

然而，上述针对直流侧稳定性提升的参数优化方法研究存在一定的局限性：首先，不同电网强度下 GCC 各控制参数对直流侧稳定性的影响关系尚不明晰，难以进一步指导参数优化；其次，考虑电网阻抗对直流侧稳定性影响的参数优化设计大多针对 PLL 参数，当电网强度较低时降低 PLL 带宽，但其调节范围有限；目前针对不同控制器参数优化的研究，大多局限于小范围内单一参数变化，缺乏较为全面的定量分析及灵敏度权重对比，针对同一控制参数，会因初始选值的不同而呈现相反的稳定性趋势[17,20]。同时，现有研究通常将同一控制器中比例系数和积分系数单独进行分析，但单一控制参数的变化会导致控制带宽、相位裕度同时发生改变，因此难以满足系统的动态和稳态要求。

针对以上问题，本文首先建立考虑电网强度对直流母线稳定性的 GCC 直流侧阻抗模型，基于直流微电网场景，以并网变流器与直流接入的恒功率负载(constant power load，CPL)交互为例，研究分析 GCC 主要控制参数对系统极点和稳定性的影响，通过主导极点的变化推导各参数灵敏度，并针对高灵敏度控制参数，提出一种低电网强度下的参数优化设计方法。最后通过仿真和实验对理论分析及所提方法的正确性进行了验证。

1 考虑电网强度影响的 GCC 直流侧阻抗建模

典型直流微电网如图 1 所示。直流微电网通过 GCC 接入交流电网。光伏、储能及负荷通过各自 DC/DC 接入直流母线。由于 DC/DC 采用恒功率控制，呈现 CPL 特性，而 CPL 从直流母线吸收功率时会呈现负阻尼特性，最不利于直流母线稳定[21-22]，因此，本文重点针对该工况开展研究。

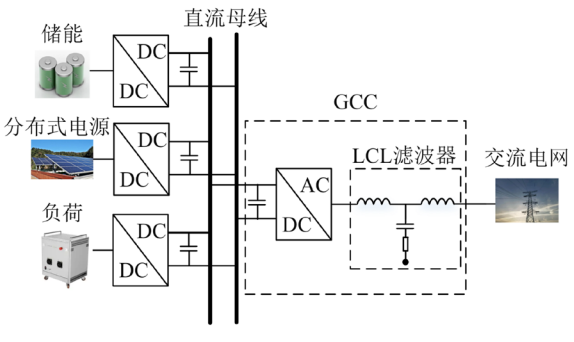


图 1 典型直流微电网示意图

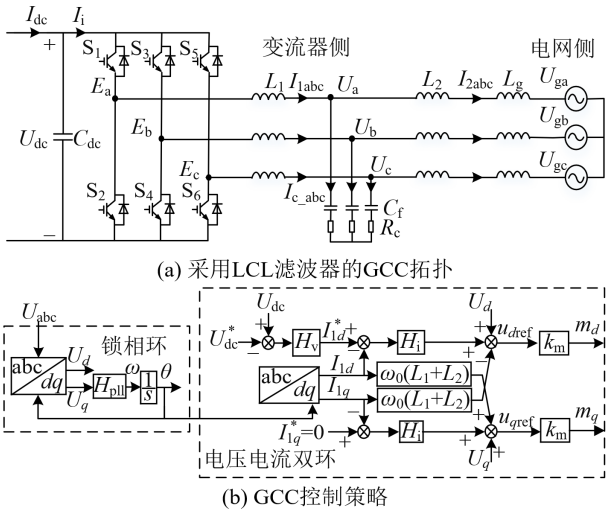
Fig.1 Schematic diagram of typical DC microgrid

1.1　直流侧阻抗建模

图 1 中并网变流器通常采用 LCL 滤波器，典型 GCC 拓扑如图 2(a)所示。图中：S_1—S_6 为开关管；L_1 和 L_2 分别为变流器侧和网侧滤波电感；L_g 为电网电感；C_f 和 R_c 分别为交流侧滤波电容及其串联无源阻尼；E_a、E_b、E_c 分别为桥臂侧的三相电压；U_a、U_b、U_c 分别为滤波电容的三相电压；U_{ga}、U_{gb}、U_{gc} 分别为电网的三相电压；I_{1abc}、I_{2abc} 分别为变流器侧和网侧电感电流；I_{c_abc} 为滤波电容电流；C_{dc} 为直流电容；U_{dc}、I_{dc}、I_i 分别为直流侧电容电压和电容前后电流。

典型 GCC 控制策略如图 2(b)所示，采用直流电压外环、电感电流内环的双环结构，基于同步旋转坐标系 dq 控制。H_{pll}、H_v、H_i 分别为 PLL、电压外环和电流内环 PI 控制器的传递函数，θ 为锁相角度，ω_0 为系统角频率；U_d、U_q 分别为 U_{abc} 的 d、q 轴分量；I_{1d}、I_{1q} 为 I_{1abc} 的 d、q 轴电流；u_{dref}、u_{qref} 分别为控制系统输出的 d、q 轴电压参考值，k_m 为调制系数，考虑一般情况通常取 $k_m=2/U_{dc}$，m_d、m_q 分别为 d、q 轴调制度。系统电压和电流参考正方向如图 2(a)中所示。

现有直流侧阻抗建模和控制参数设计研究大多针对理想电网或强电网，但电网强度降低时，系统受到电网阻抗交互加剧。GCC 在控制环节中引入的电压相角与实际系统中的旋转角度存在偏差 Φ，可通过控制旋转坐标系和系统旋转坐标系来区分，如图 3 所示。相关变量分别采用上标 c 和上标 r 表示，Δ 用于指代相关变量的小信号形式，$\boldsymbol{T}_\phi$ 为旋转变换矩阵，如式(1)所示。参照文献[12]可以得到，



(a) 采用LCL滤波器的GCC拓扑

(b) GCC控制策略

图 2　GCC 拓扑与控制策略

Fig.2　GCC topology and control strategy

控制坐标系和系统坐标之间的传递矩阵如式(2)所示。

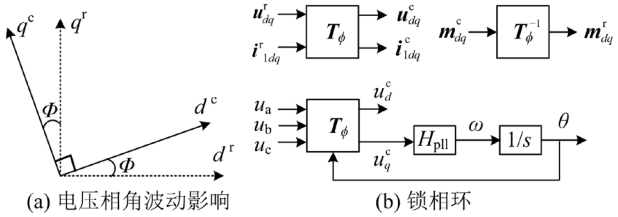
$$\boldsymbol{T}_\varphi=\begin{bmatrix}\cos\varphi & \sin\varphi\\ -\sin\varphi & \cos\varphi\end{bmatrix} \tag{1}$$

$$\begin{cases}G_{pll}=\dfrac{H_{pll}}{s+U_dH_{pll}}\\ \Delta\boldsymbol{u}_{dq}^{c}=\boldsymbol{G}_{pll}^{v}\Delta\boldsymbol{u}_{dq}^{r}\\ \Delta\boldsymbol{i}_{1dq}^{c}=\boldsymbol{G}_{pll}^{i}\Delta\boldsymbol{u}_{dq}^{r}+\Delta\boldsymbol{i}_{1dq}^{r}\\ \Delta\boldsymbol{m}_{dq}^{c}=\Delta\boldsymbol{m}_{dq}^{r}-\boldsymbol{G}_{pll}^{m}\Delta\boldsymbol{u}_{dq}^{r}\\ \boldsymbol{G}_{pll}^{v}=\begin{bmatrix}1 & U_qG_{pll}\\ 0 & 1-U_dG_{pll}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{G}_{pll}^{i}=\begin{bmatrix}0 & I_{1q}G_{pll}\\ 0 & -I_{1d}G_{pll}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{G}_{pll}^{m}=\begin{bmatrix}0 & -m_qG_{pll}\\ 0 & m_dG_{pll}\end{bmatrix}\end{cases} \tag{2}$$

根据图 2 和式(1)—(2)可推导 LCL 型 GCC 在 dq 坐标系下的小信号框图如图 4 所示，其中 $\boldsymbol{I}_{22}$ 为 2×2 单位矩阵，$\boldsymbol{Z}_g$、$\boldsymbol{Z}_{f1}$、$\boldsymbol{Z}_{f2}$ 分别为电网阻抗和 LCL 滤波器变流器侧阻抗、网侧阻抗，其表达式见附录 A 式(A1)。$\boldsymbol{G}_v$、$\boldsymbol{G}_i$ 为电压外环电流内环控制矩阵，k_{vp}、k_{vi} 和 k_{ip}、k_{ii} 分别为电压环和电流环比例、积分系数，$\boldsymbol{G}_{dec}$ 为电流环解耦矩阵，表达式见附录 A 式(A2)。$\boldsymbol{G}_{q1}$、$\boldsymbol{G}_{q2}$、$\boldsymbol{G}_{cr}$ 为考虑 PLL 带来的角速度 ω 扰动产生的耦合矩阵，$\boldsymbol{Y}_c$ 和 $\boldsymbol{G}_{qc}$ 为滤波电容电压和电流之间的耦合矩阵，表达式见附录 A 式(A3)。滤波电容电压与电容电流之间的耦合关系见附录 A 图 A1。

考虑图 4 中电网阻抗 Z_g 的影响，建立 GCC 直流侧 Δu_{dc} 到 Δi_{dc} 的小信号传递函数，进一步得到 GCC 直流侧导纳 Y_{dc} 小信号框图如图 5 所示。其中 $\boldsymbol{G}_{pll_A}$ 为考虑锁相环影响的耦合项，体现在 $\boldsymbol{G}_x$ 中，$\boldsymbol{G}_{I1dq2Udq}$ 为变流器侧电流到滤波电容电压的传递函数，包含电网阻抗 Z_g，$\boldsymbol{G}_{Udc2I1dq}$ 为直流电压到变流器侧电流的传递函数，$\boldsymbol{G}_{Udc2mdq}$ 为直流电压到调制度的传递函数，见式(3)。

通过 $\boldsymbol{G}_{Udc2I1dq}$ 及 $\boldsymbol{G}_{Udc2mdq}$ 可推导 GCC 直流侧导纳 Y_{dc} 和阻抗 Z_{dc} 如式(4)所示，上标 T 表示矩阵转置。



(a) 电压相角波动影响　(b) 锁相环

图 3　考虑电压相角波动影响的锁相环示意图

Fig.3　Schematic diagram of phase-locked loop considering the influence of voltage phase angle fluctuation

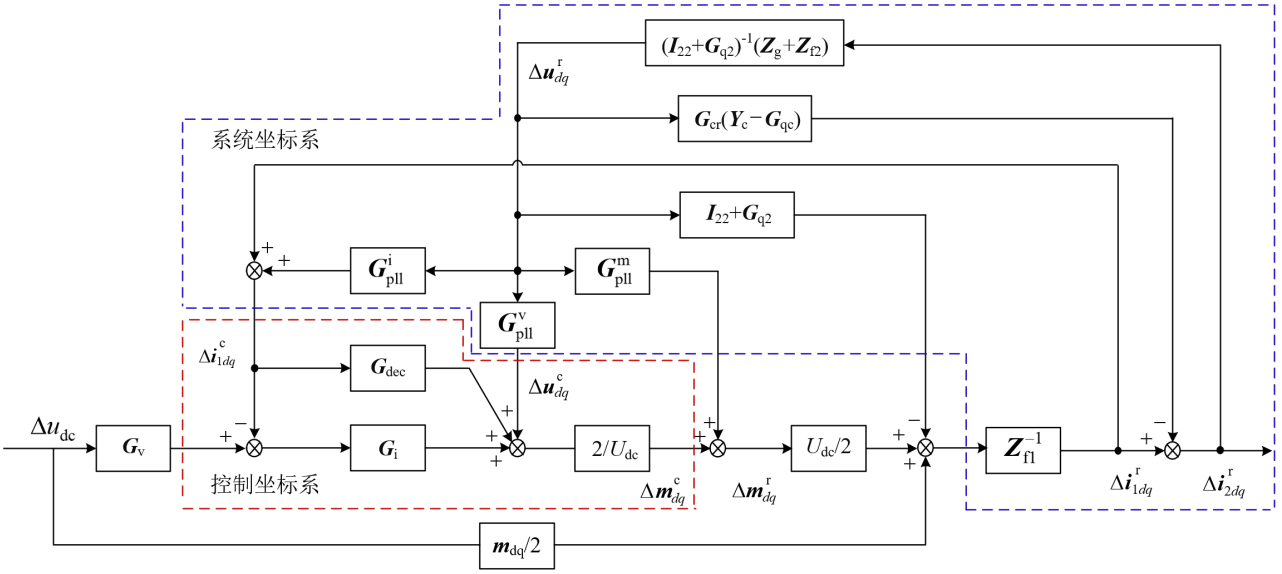


图 4 GCC 在 *dq* 坐标系下小信号框图

Fig.4 Block diagram of GCC small signal in *dq* frame

$$\begin{cases}
\boldsymbol{G}_{\text{pll_A}}=\dfrac{1}{2}U_{\text{dc}}\boldsymbol{G}_{\text{pll}}^{\text{m}}+(\boldsymbol{G}_{\text{dec}}-\boldsymbol{G}_{\text{i}})\boldsymbol{G}_{\text{pll}}^{\text{i}}+\boldsymbol{G}_{\text{pll}}^{\text{v}} \\
\boldsymbol{G}_{\text{I1}dq\text{2U}dq}=\dfrac{\Delta\boldsymbol{u}_{dq}^{\text{r}}}{\Delta\boldsymbol{i}_{1dq}^{\text{r}}}=\dfrac{\boldsymbol{Z}_{\text{g}}+\boldsymbol{Z}_{\text{f2}}}{\boldsymbol{I}_{22}+\boldsymbol{G}_{\text{q2}}+(\boldsymbol{Z}_{\text{g}}+\boldsymbol{Z}_{\text{f2}})\boldsymbol{G}_{\text{cr}}(\boldsymbol{Y}_{\text{c}}-\boldsymbol{G}_{\text{qc}})} \\
\boldsymbol{G}_{\text{x}}=(\boldsymbol{G}_{\text{pll_A}}\text{-}\boldsymbol{I}_{22})\boldsymbol{G}_{\text{I1}dq\text{2U}dq}+(\boldsymbol{G}_{\text{dec}}-\boldsymbol{G}_{\text{i}})-Z_{\text{f1}} \\
\boldsymbol{G}_{\text{Udc2I1}dq}=\dfrac{\Delta\boldsymbol{i}_{1dq}^{\text{r}}}{\Delta u_{\text{dc}}}=\boldsymbol{G}_{\text{x}}^{-1}(-\dfrac{1}{2}\boldsymbol{m}_{dq}-\boldsymbol{G}_{\text{i}}\boldsymbol{G}_{\text{v}}) \\
\boldsymbol{G}_{\text{Udc2m}dq}=\dfrac{\Delta\boldsymbol{m}_{dq}^{\text{r}}}{\Delta u_{\text{dc}}}=\dfrac{2}{U_{\text{dc}}}(\boldsymbol{I}_{22}+\dfrac{\boldsymbol{Z}_{\text{f1}}+\boldsymbol{G}_{\text{I1}dq\text{2U}dq}}{\boldsymbol{G}_{\text{x}}})(-\dfrac{1}{2}\boldsymbol{m}_{dq}-\boldsymbol{G}_{\text{i}}\boldsymbol{G}_{\text{v}})+ \\
\qquad\dfrac{2}{U_{\text{dc}}}\boldsymbol{G}_{\text{i}}\boldsymbol{G}_{\text{v}}
\end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases}
Y_{\text{dc}}=\dfrac{\Delta i_{\text{dc}}}{\Delta u_{\text{dc}}}=\dfrac{3}{4}(\boldsymbol{m}_{dq}^{\text{T}}\boldsymbol{G}_{\text{Udc2I1}dq}+\boldsymbol{I}_{1dq}^{\text{T}}\boldsymbol{G}_{\text{Udc2m}dq})+sC_{\text{dc}} \\
Z_{\text{dc}}=\dfrac{1}{Y_{\text{dc}}}
\end{cases} \tag{4}$$

1.2 GCC 与 CPL 交互影响分析

以直流母线接入 CPL 为例，分析 GCC 直流侧阻抗特性及对直流侧稳定性影响，主要参数如表 1 所示。其中，GCC 参照文献[23]中的典型控制参数设计，PLL 控制带宽设定为 20 Hz，阻尼比为 0.707，GCC 电流环带宽设定为开关频率的 1/10，即 1 kHz。电压外环根据控制带宽一般为内环的 1/10 左右，本文设定为 110 Hz，相位裕度通常在 40°~60°之间，本文设定为 40°。

直流母线接入的 CPL，以储能和双向 DC/DC 变换器构成的 CPL 为例，双向 DC/DC 采用 Buck-Boost 拓扑，参照文献[24]中 CPL 阻抗建模方法推导得到直流侧阻抗 Z_{cpl} 如式(5)所示。其中，P_{cpl}

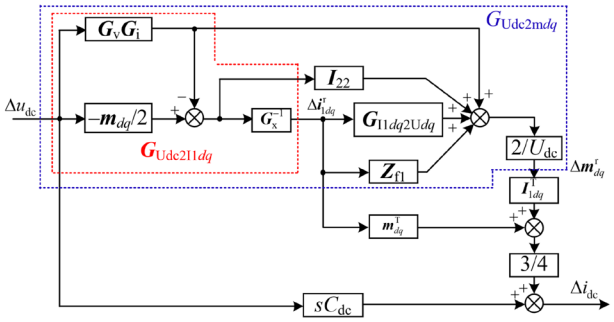


图 5 GCC 直流侧导纳小信号框图

Fig.5 Block diagram of GCC DC side admittance small signal

表 1 电网和 GCC 参数

Table 1 Grid and GCC parameters

参数类型	参数名称	数值
电网参数	相电压有效值/V	55
	频率/Hz	50
	电网 L_g/mH	2、10、19、23
	SCR	28.9、5.78、3.04、2.51
GCC 参数	直流电压/V	200
	交流电压/V	55
	功率/W	–500
	直流母线电容 C_{dc}/μF	680
	变流器侧电感 L_1/mH	10
	网侧电感 L_2/mH	2
	滤波电容 C_f/μF	5.6
	无源阻尼 R_c/Ω	5
GCC 控制参数	AC/DC 电压外环比例系数 k_{vp}	0.28
	AC/DC 电压外环积分系数 k_{vi}	135
	AC/DC 电流内环比例系数 k_{ip}	50
	AC/DC 电流内环积分系数 k_{ii}	10
	PLL 比例系数	1.1
	PLL 积分系数	47

为 CPL 功率，C_{cpl} 为直流母线侧电容，L_{cpl} 为储能侧电感，U_{lv} 为储能侧电压，I_{cpl} 为储能侧电流，G_{i_cpl} 为电流控制器传递函数，D 为稳态占空比，$D=U_{lv}/U_{dc}$。

$$Z_{cpl}=\frac{L_{cpl}s+U_{dc}G_{i_cpl}}{C_{cpl}L_{cpl}s^2+D^2+(sC_{cpl}U_{dc}+\dfrac{P_{cpl}}{U_{dc}})G_{i_cpl}} \tag{5}$$

当直流微电网可能存在多个 DC/DC 连接的分布式电源、储能或直流负荷时，以 n 个 Buck-Boost 拓扑工作在不同稳态工作点的 CPL 为例，可知 n 个 CPL 并联后阻抗 $Z_{total}=Z_{cpl_1}//Z_{cpl_2}//\cdots//Z_{cpl_n}$，可等效聚合成式(5)，其中：

$$\begin{cases} C_{cpl}=\sum_{i=1}^{n}C_{cpl_i} \\ U_{lv}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}U_{lv_i}^2} \\ P_{cpl}=\sum_{i=1}^{n}P_{cpl_i} \end{cases} \tag{6}$$

式中：下标 i 表示第 i 个 CPL 相应的变量。附录 B 图 B1 给出了 n=3 工况下多机 CPL 阻抗及等效聚合 CPL 阻抗，主要参数如附录 B 表 B1、B2 所示。可知，多机 CPL 并联特性与等效聚合阻抗特性基本一致。当直流母线存在通过其他拓扑和控制的 DC/DC 时，也可以在类似等效求出并联阻抗后，将其作为本文所提参数优化方法的输入条件，进而开展后续分析与设计。

IEEE 2800-2022 标准中，采用电网短路比(short-circuit ratio, SCR)表征电网强度，SCR 与电网阻抗呈反比关系，图 6 给出了不同 SCR 的 GCC 直流侧阻抗与上述等效聚合 CPL 阻抗的交互影响情况。可见，当 SCR 取 3.04 时，GCC 直流侧阻抗和 CPL 输入阻抗交互，系统相位裕度记作 φ_s，此时 φ_s 为 4.7°，仍处于稳定区域；但随着电网强度进一步降低，当 SCR 取 2.51 时，系统相位裕度 φ_s 为−15°，系统发生失稳。可见，电网强度对直流母线稳定性存在较大影响，若 GCC 仍采用理想电网或强电网下控制参数设计方法，则直流母线存在失稳风险。

2　考虑电网强度影响的 GCC 控制参数优化设计研究

2.1　GCC 主要参数变化时系统闭环极点分析

GCC 直流侧阻抗 Z_{dc} 与 CPL 阻抗 Z_{cpl} 构成级联形式，分为源子系统和负载子系统，如图 7(a)所示。直流母线电压表达式如式(7)所示，其中 U_s 为电源子系统电压，I_L 为负荷子系统电流。系统的稳定性主要取决于式(7)中的分母部分，其倒数可以等效为前向通道增益为 1、负反馈增益为阻抗比 Z_{dc}/Z_{cpl} 的闭环控制系统，如图 7(b)所示。因此可以根据系统主导极点来分析系统的稳定性。

$$U_{dc}=\frac{U_s+Z_{dc}I_L}{1+Z_{dc}/Z_{cpl}} \tag{7}$$

根据式(7)绘制系统闭环极点并进行编号，如图 8 所示。可见，当 SCR 取 3.04(L_g=19 mH)时，系统在靠近虚轴位置共有 12 个极点，其中有 5 对极点为

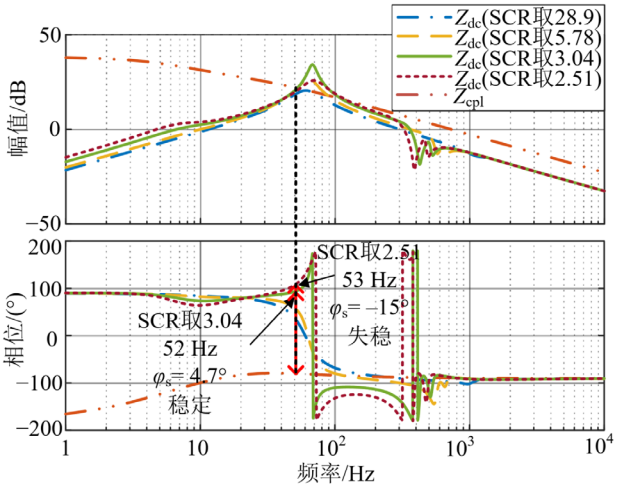
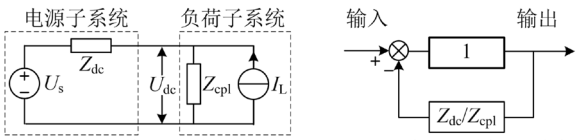


图 6　直流侧阻抗特性分析

Fig.6　Analysis of DC side impedance characteristics



(a) 系统源荷划分　(b) 等效负反馈闭环系统

图 7　系统源荷划分及闭环系统

Fig.7　Source/load division and closed-loop system

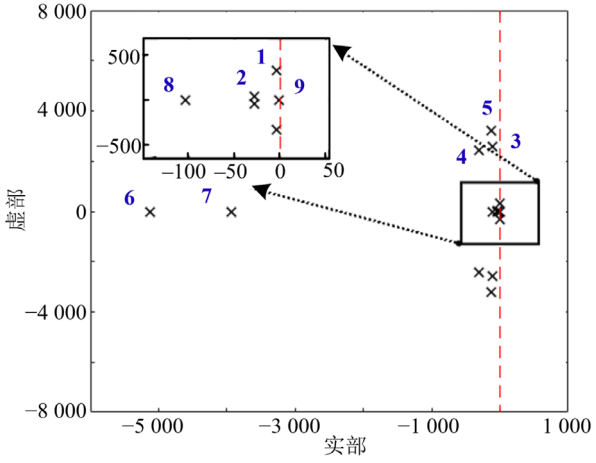


图 8　等效闭环系统极点编号

Fig.8　Poles numbering of equivalent closed-loop system

共轭极点，4 个极点位于实轴。编号为 2 的共轭极点频率为 PLL 闭环传递函数谐振频率，影响系统的低频特性，编号为 1 的共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 对直流母线稳定性影响最大，详细分析如图 9 所示。

如图 9(a)所示，直流母线电压外环比例系数 k_{vp} 增大时(0.1~1.0)，共轭极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 先左移，在 k_{vp}=0.27 时左穿越虚轴，系统稳定；在 k_{vp}=0.35 处发生转折，继续增大 k_{vp} 将会导致主导极点右移；k_{vp}=0.66 时右穿越虚轴，系统失稳。

如图 9(b)所示，直流母线电压外环积分系数 k_{vi} 增大时(10~200)，共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 先左移，再逐渐向右半平面移动，系统稳定性变差，k_{vi}=145 时右穿越虚轴，系统失稳。

如图 9(c)所示，电流内环比例系数 k_{ip} 增大时(1~150)，共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 从右半平面左移，系统稳定性变好，k_{ip}=40 时左穿越虚轴，系统稳定。

如图 9(d)所示，电流内环积分系数 k_{ii} 增大时(1~50)，共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 没有任何变化，对系统稳定性无影响。

如图9(e)所示，GCC功率增大时(–100 W至–800 W)，共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 从左半平面右移，系统稳定性变差，P_{GCC}= −540 W 时右穿越虚轴，系统失稳。

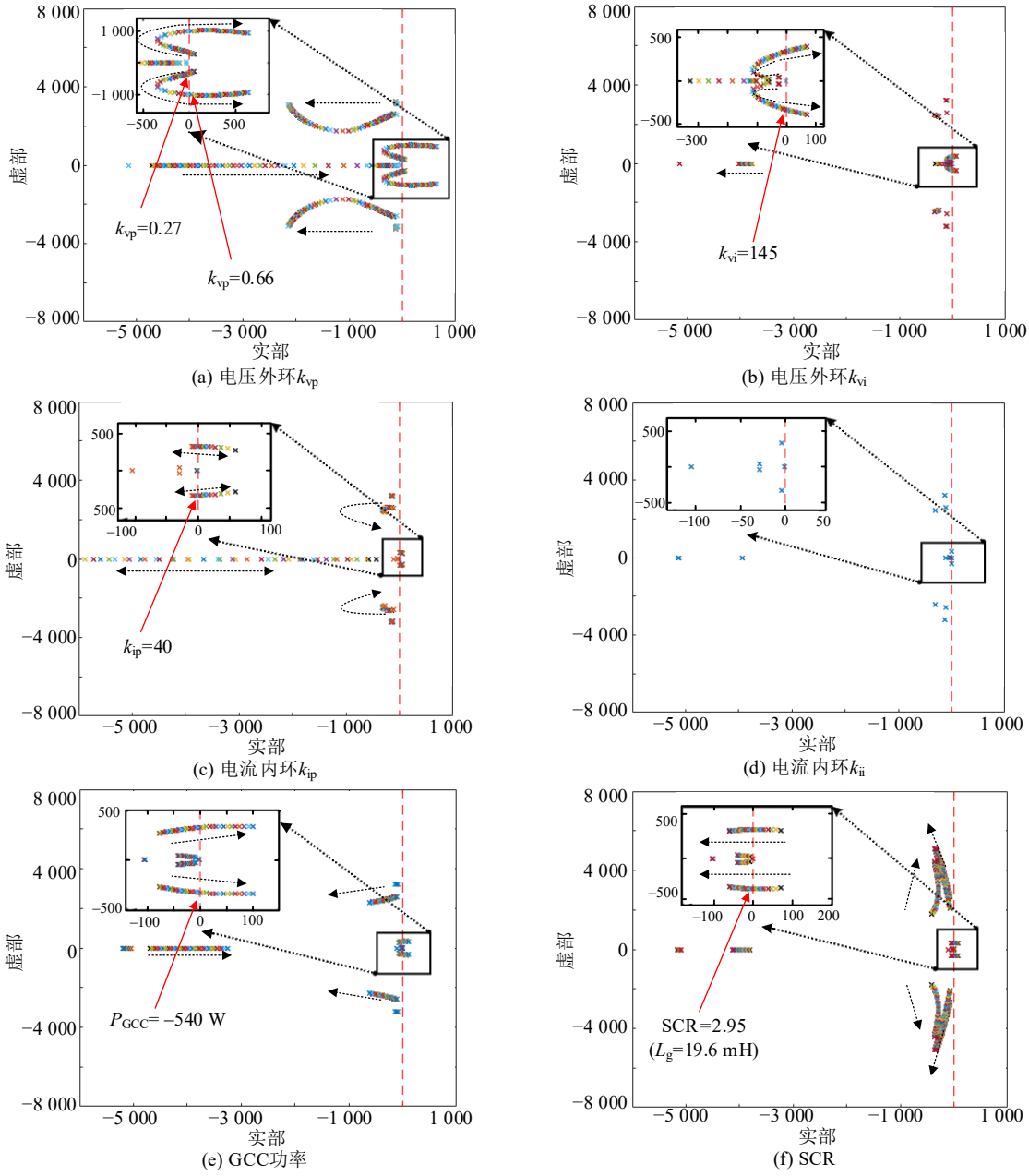


图 9 参数变化对系统极点的影响

Fig.9 Influence of parameter changes on the poles of the system

如图 9(f)所示，SCR 增大时(2~10)，共轭主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 左移，系统稳定性变好，SCR 取 2.95(L_g=19.5 mH)时左穿越虚轴，系统稳定。

2.2　GCC 主要参数对直流侧稳定影响的灵敏度对比

基于 2.1 节中主要参数对等效闭环系统极点影响的定量分析结果，以表 1 中的数据为基准值，进一步分析 GCC 主要参数 k_{vp}、k_{vi}、k_{ip}、k_{ii}、P_{GCC} 对系统极点变化的灵敏度。首先定义雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_F$ 如式(8)所示，其中 λ 是系统第 n 个极点，σ_n 是第 n 个极点的实部；然后计算偏导数如式(9)所示，其中 Y={k_{vp}、k_{vi}、k_{ip}、k_{ii}、P_{GCC}}，$\sigma_n|Y_\Delta$ 代表 σ_n 的值随 Y_Δ 小范围变化(采用 1%基准值变动)而产生的变化量，当极点发生左移时为负灵敏度，发生右移时为正灵敏度。

$$\boldsymbol{J}_F(\lambda_n)=\left[\frac{\partial\sigma_n}{\partial k_{vp}}\quad\frac{\partial\sigma_n}{\partial k_{vi}}\quad\frac{\partial\sigma_n}{\partial k_{ip}}\quad\frac{\partial\sigma_n}{\partial k_{ii}}\quad\frac{\partial\sigma_n}{\partial P_{GCC}}\right] \tag{8}$$

$$\frac{\partial\sigma_n}{\partial Y}=\frac{\sigma_n|Y_0-\sigma_n|Y_\Delta}{\sigma_n|Y_0} \tag{9}$$

图 8 给出了 9 个极点的编号，针对变动幅度较大的 1—7 号极点进行分析。在不同的电网强度下，Y 中 GCC 参数以基准值 1%的变化增大，系统主导极点 1 的变化情况如表 2 所示。

为直观体现不同电网强度下 GCC 参数对等效闭环系统极点的影响程度，绘制灵敏度柱状图如图 10 所示。可见，Y 中包含的 5 个元素中，除了电流内环积分系数 k_{ii} 外，其他参数对主导极点 1 都有影响，其中 GCC 电压外环控制参数和 GCC 功率的变化对灵敏度影响最大。当电网强度较高(SCR 取 28.9)时，如图 10(a)所示，GCC 电压外环比例系数 k_{vp} 的灵敏度最高，k_{vp} 发生改变时，系统主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 的变化幅度最大，但整体上各参数的灵敏度量级较小，只在±0.02 区间变化。然而，当电网强度较低(SCR 取 3.04)时，如图 10(b)所示，GCC 电压外环积分系数 k_{vi} 灵敏度最高，反超了电压外环比例系数 k_{vp}；当 k_{vi} 发生改变时，系统主导极点 λ_{1a} 和 λ_{1b} 的变化幅度最大，且灵敏度增大了近 20 倍，在±0.405 区间变化，对系统稳定产生明显影响。

由此可知，当电网强度较高时，GCC 电压外环控制参数和电流内环控制参数对系统直流侧稳定性的影响较小，参数可选范围宽；然而在低电网强度下，GCC 电压外环控制参数对系统稳定的影响灵敏度骤升，远高于电流内环，参数可选范围缩小，小幅改变可能引发直流侧失稳。

2.3　低电网强度下 GCC 高灵敏度控制参数优化设计

由图 10 主要参数灵敏度对比结果可知，考虑到电网强度对直流母线稳定性影响的高灵敏度控制参数为 GCC 电压外环比例、积分系数，有必要针对低电网强度下电压外环控制参数进行优化设计。

基于表 1 参数，考虑系统的动态及稳态特性，GCC 电压外环控制带宽 f_{vBW} 需在 90~150 Hz 范围内

表 2　系统主导极点 1 随 GCC 参数变化情况

Table 2　Variation of the dominant pole 1 of the system with the GCC parameters

参数	SCR 取 28.9 时的极点 1 (变化前：−72.8±j304.61)		SCR 取 3.04 时的极点 1 (变化前：−3.885±j329.747)	
	变化后	灵敏度	变化后	灵敏度
k_{vp}	−73.99±j304.673	−0.016	−4.980±j330.815	−0.282
k_{vi}	−72.261±j306.372	0.007	−2.310±j331.310	0.405
k_{ip}	−72.871±j304.543	−0.001	−4.025±j329.756	−0.036
k_{ii}	−72.800±j304.610	0	−3.885±j329.747	0
P_{GCC}	−72.488±j304.928	0.004	−2.606±j330.327	0.329

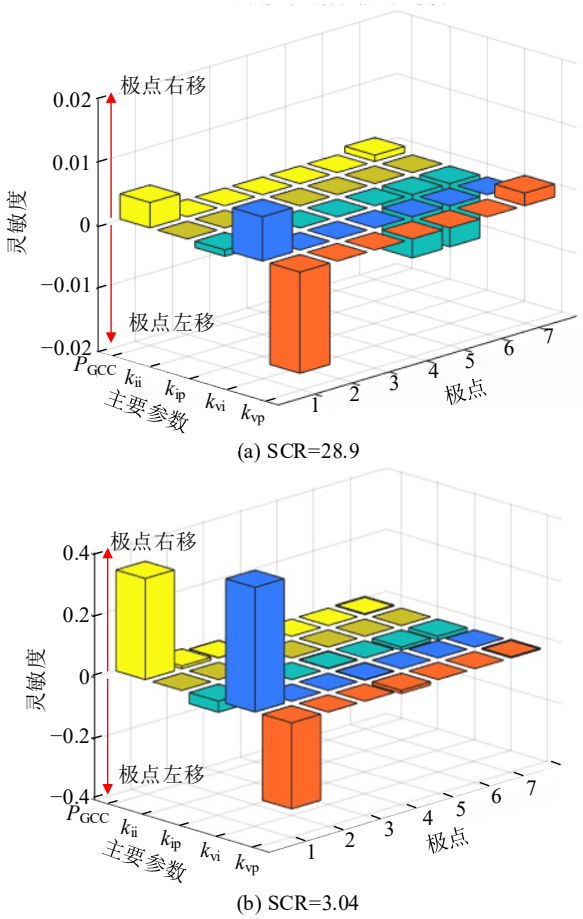


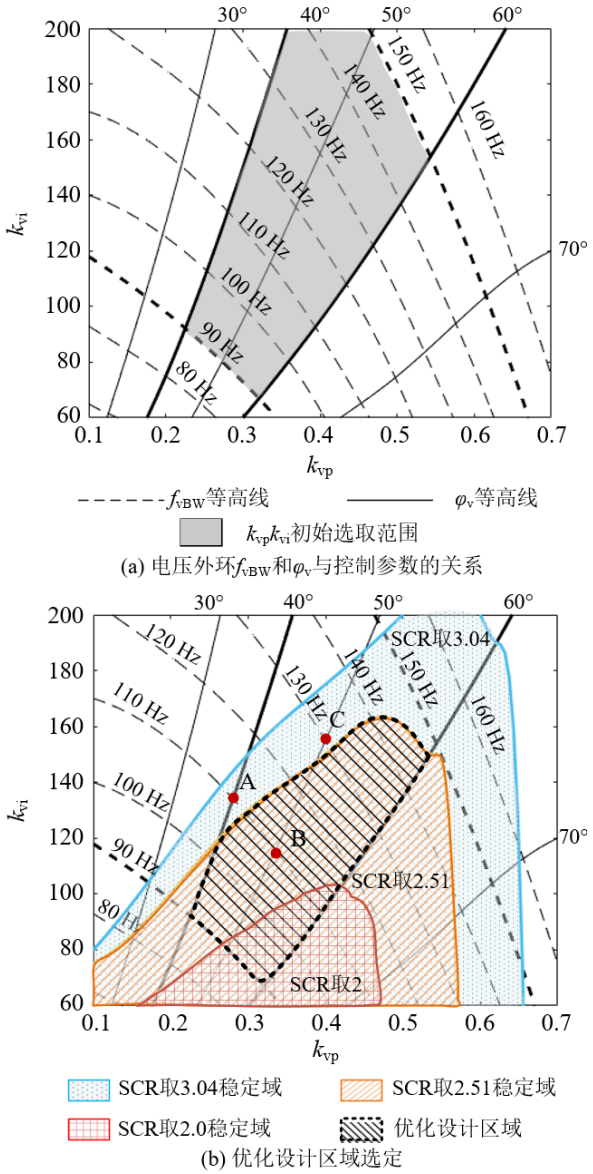
图 10　不同电网强度下 GCC 参数对系统极点的灵敏度

Fig.10　Sensitivity of GCC parameters to poles under different power grid strengths

容，相位裕度 φ_v 需在 40°~60°范围内，确定 f_{vBW} 和 φ_v 的初始选取范围，如图 11(a)所示；其次，根据前文中对系统极点的分析，确定 SCR、f_{vBW}、φ_v 三者同时变化时系统最右极点的实部位置，得到系统稳定区域；最后，明确系统需耐受的 SCR，得到该电压外环的 f_{vBW} 和 φ_v 范围，与控制参数初始选取范围形成交集，从而实现电压外环优化参数设计，如图 11(b)所示。综上，GCC 电压外环控制参数 k_{vp} 在低电网强度下对直流母线稳定性的影响存在双重趋势，单纯增大或减小均可能导致失稳，需结合 k_{vi} 进行统一设计。

选取 SCR 在 2~3.04 区间稳定域剖面中 A、B、C 这 3 点进行分析，具体为：A 点，f_{vBW}=110 Hz，φ_v=40°(k_{vp}=0.28，k_{vi}=135)；B 点，f_{vBW}=110 Hz，φ_v=50°(k_{vp}=0.34，k_{vi}=116)；C 点，f_{vBW}=130 Hz，φ_v=50°(k_{vp}=0.4，k_{vi}=153)。

绘制 GCC 和 CPL 的阻抗伯德图如图 12 所示，可见，A 点工况存在 2 个交截点，在 53 Hz 交截频率处系统相位裕度 φ_s 不足发生失稳，在 123 Hz 交截频率处未失稳；B 点在 53 Hz 和 233 Hz 这 2 个交截频率处相位差小于 180°，系统稳定；C 点工况存在 2 个交截点，在 209 Hz 处 φ_s 足够，系统未失稳，

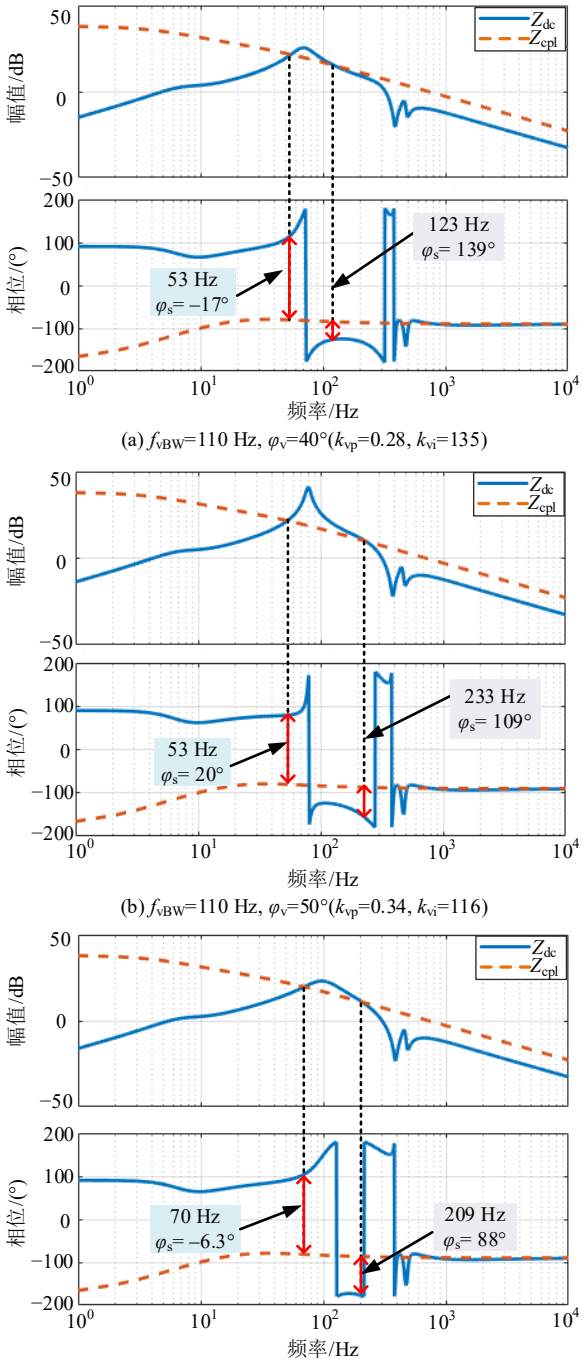


(a) 电压外环f_{vBW}和φ_v与控制参数的关系

(b) 优化设计区域选定

图 11 电压外环控制参数优化及 SCR 稳定域分析

Fig.11 Analysis of voltage outer loop control parameters and SCR stability region



(a) f_{vBW}=110 Hz, φ_v=40°(k_{vp}=0.28, k_{vi}=135)

(b) f_{vBW}=110 Hz, φ_v=50°(k_{vp}=0.34, k_{vi}=116)

(c) f_{vBW}=130 Hz, φ_v=50°(k_{vp}=0.4, k_{vi}=153)

图 12 A、B、C 3 点对应的伯德图

Fig.12 Bode plot corresponding to points A, B, and C

但在 70 Hz 处 φ_s 不足导致失稳。综上所述，所提的高灵敏度控制参数优化设计方法流程如图 13 所示。

3　仿真及实验验证

3.1　阻抗扫频验证

通过直流侧注入电压扰动 Δu 的方法进行阻抗仿真扫频验证[13]，如图 14 所示，分别检测 GCC 和 CPL 直流侧端口的电流响应，即可得到其阻抗特性 Z_{dc} 和 Z_{cpl}，仿真参数如表 1、附录 B 表 B2 所示。

图 15 给出了 SCR 为 28.9、3.04，即 L_g 分别为 2、19 mH 时 Z_{dc} 及 Z_{cpl} 与扫频结果的对比。可见，阻抗扫频结果与理论推导一致，验证了直流侧阻抗模型的准确性。

3.2　不同电网强度下 GCC 控制参数优化验证

为了验证不同电网强度下 GCC 控制参数的优化效果，改变电网阻抗，观察不同 SCR 下系统直流侧失稳情况，得到仿真波形如图 16 所示。由仿真结果可知，当 SCR 为 3.04 时，系统运行在 A 点工况时能够保持稳定；但当 t=0.3 s，SCR 变为 2.51 时，直流母线发生失稳。直流母线电压的快速傅里叶变换(fast Fourier transform，FFT)分析结果如图 17(a)所示，振荡频率为 53 Hz，与图 12(b)的理论分析一致。当 t=0.8 s 时，系统从 A 点工况切换至经过控制参数优化的 B 点工况，振荡得到抑制，直流母线电压恢复稳定。当 t=1.4 s 时，系统从 B 点工况切换至 C 点，再次发生了振荡，直流母线电压的 FFT 分析结果如图 17(b)所示，振荡频率为 70 Hz，与图 12(c)中理论分析振荡频率 70 Hz 一致。可见控制参数优化设计方法有效，经过控制参数优化的 B 点工况能够在 SCR=2.51 场景下实现稳定运行。

3.3　实验验证

为了进一步验证理论分析的正确性，搭建低电网强度下 GCC 与 CPL 级联实验平台如图 18 所示，其中，DC/DC 低压侧连接直流源，模拟 CPL，实验参数与表 1、附录 B 表 B2 保持一致。

图 19 给出了 SCR=2.51(L_g=23 mH)时电压外环控制参数优化前后的实验波形，图 19(a)为控制参数优化前 A 点工况切换至参数优化后 B 点工况的实验波形，其中直流母线电压偏置为 200 V。可见，A 点工况下直流母线电压发生振荡，振荡频率为 53 Hz，当切换至 B 点工况后直流母线电压恢复稳定，与理论分析结果一致。图 19(b)为 B 点工况切换至 C 点

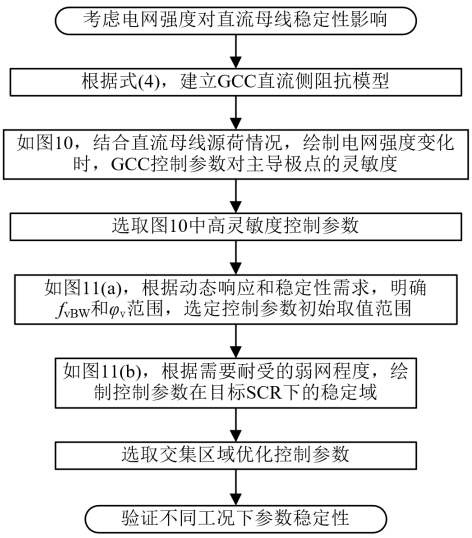


图 13　考虑电网强度的 GCC 控制参数设计流程

Fig.13　Design process of GCC control parameters considering grid strength

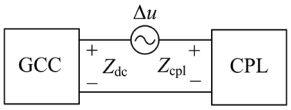


图 14　直流侧阻抗仿真扫频示意图

Fig.14　Schematic diagram of DC side impedance simulation frequency sweep

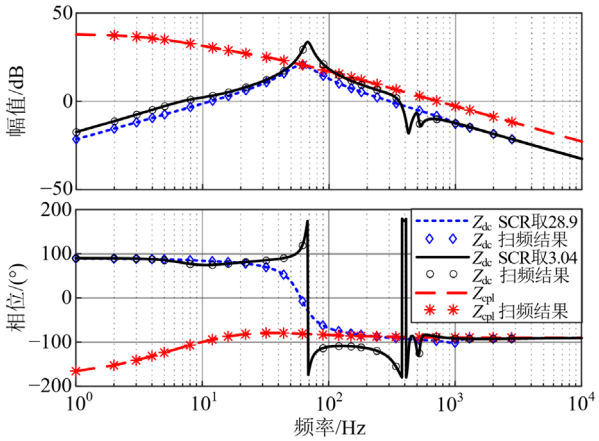


图 15　GCC 及 CPL 阻抗模型与扫频对比

Fig.15　GCC and CPL impedance models and frequency sweep comparison

工况的实验波形，当切换至 C 点工况后直流母线电压发生振荡，振荡频率为 69 Hz，与理论分析结果 70 Hz 基本一致。上述实验结果进一步验证了低电网强度下所提参数优化设计方法的有效性。

4　结论

1）建立了考虑电网强度对直流母线稳定性影

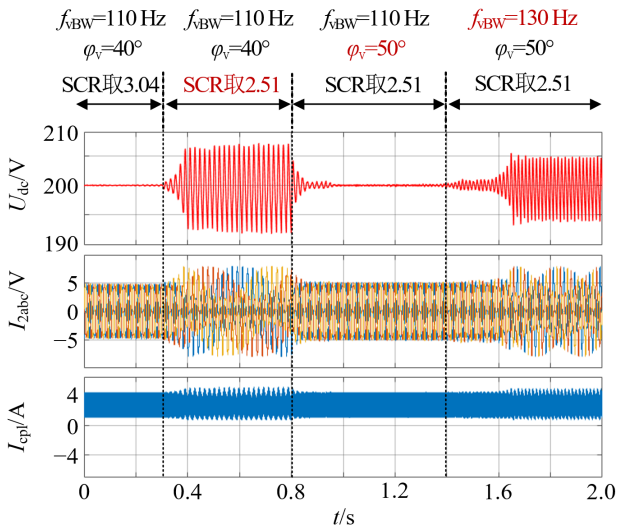


图 16 SCR 及控制参数改变时仿真波形

Fig.16 Simulation waveform when SCR and control parameters change

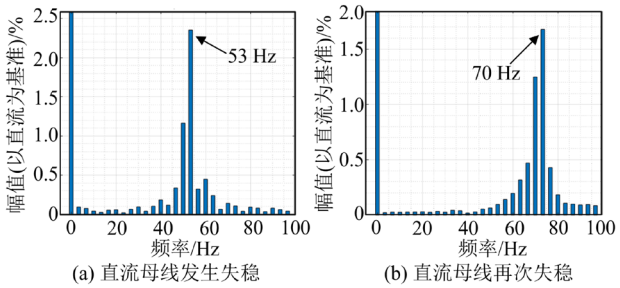


图 17 失稳工况 FFT 分析

Fig.17 FFT analysis of unstable operating conditions

响的 GCC 直流侧阻抗模型，理论分析、仿真及实验扫频结果表明，基于强电网或理想电网设计的 GCC 控制参数，在较低电网强度下可能导致直流母线失稳。

2）定量分析了 GCC 主要参数变化对系统极点的影响，进一步对比了主要参数对系统极点及直流母线稳定性影响的灵敏度。当电网强度较高时，GCC 电压外环比例系数灵敏度最高；当电网强度较低时，电压外环积分系数灵敏度最高，且电压外环控制参数的灵敏度随着电网强度的降低显著提升，低电网强度工况时增大了近 20 倍，而小范围变动则可能引起直流母线失稳。

3）提出了低电网强度下 GCC 高灵敏度控制参数的图形化优化设计方法，指出 GCC 电压外环控制参数 k_{vp} 在低电网强度下对直流母线稳定性的影响存在双重趋势，单纯增大或减小均可能导致失稳，需结合 k_{vi} 进行统一设计。仿真和实验结果表明，所提方法全面直观且能够可视化，在不改变控制结构、

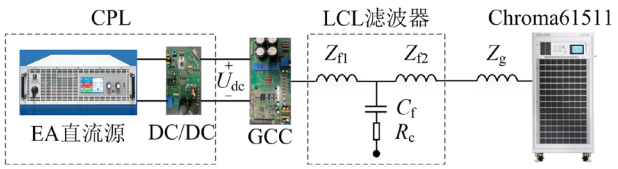


图 18 实验平台

Fig.18 Experimental platform

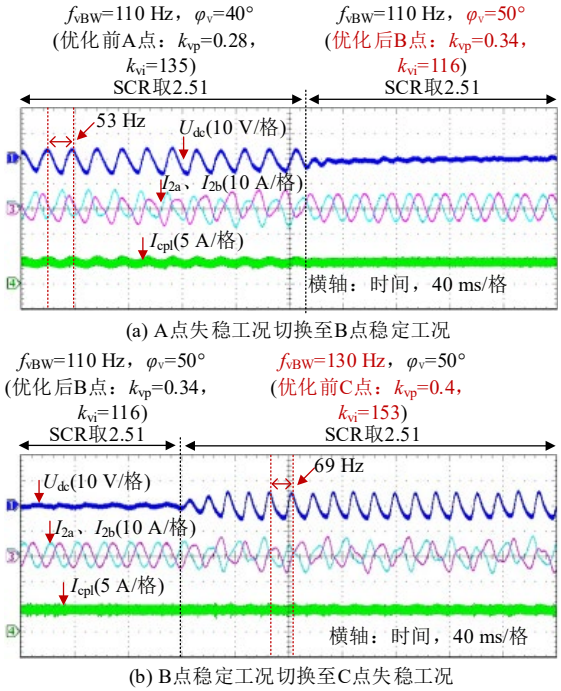


图 19 电压外环控制参数优化前后实验波形

Fig.19 Experimental waveforms before and after parameter optimization

增加系统成本、兼顾 GCC 动态和稳态特性的前提下，能够有效提升低电网强度下直流母线稳定性。

本文虽然以 CPL 为例，但所提 GCC 控制参数优化设计方法同样适用于直流母线接入其他类型源荷的场景。此外，随着 SCR 的持续降低，极弱电网下稳定域可能和控制参数初始选定区域无交集，后续可在控制参数优化的基础上进一步研究稳定性提升方法。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 蔡 旭，郭子腾，宗皓翔，等. 新能源发电并网装备技术发展综述[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3972-3991.
CAI Xu, GUO Ziteng, ZONG Haoxiang, et al. Review on the technology development of grid-tied equipment for renewable power generations[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3972-3991.

[2] 盛万兴，刘科研，李 昭，等. 新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：1-18.
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18.

[3] 葛豪宇，杨　明，方　聪，等. 弱电网下计及并网逆变器耦合效应的新型锁相环设计方法及其稳定性分析[J]. 电网技术，2024，48(12)：5108-5117.
GE Haoyu, YANG Ming, FANG Cong, et al. A new phase-locked loop design method and stability analysis considering the coupling effect of grid-connected inverter under weak grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5108-5117.

[4] 刘　芳，李　研，何国庆，等. 极弱电网下直驱风电并网变流器小信号建模及稳定性运行策略分析[J]. 电力自动化设备，2022，42(8)：167-173.
LIU Fang, LI Yan, HE Guoqing, et al. Small signal modeling and stable operation strategy analysis of direct drive wind power grid-connected converter in extremely weak power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 167-173.

[5] 黄云辉，宋泽凡，唐金锐，等. 连接弱电网的并网变换器直流电压时间尺度稳定器的设计与分析[J]. 电工技术学报，2018，33(增刊1)：185-192.
HUANG Yunhui, SONG Zefan, TANG Jinrui, et al. Design and analysis of DC-link voltage stabilizer for voltage source converter as connected to weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(Supplement1): 185-192.

[6] 黄旭程，刘亚丽，陈燕东，等. 直流电网阻抗建模与振荡机理及稳定控制方法[J]. 电力系统保护与控制，2020，48(7)：108-117.
HUANG Xucheng, LIU Yali, CHEN Yandong, et al. Impedance-based modeling, stability analysis and virtual damping approach in DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 108-117.

[7] ZHAO L, JIN Z M, WANG X F. Analysis and damping of low-frequency oscillation for DC-Link voltage-synchronized VSCs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(7): 8177-8189.

[8] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.

[9] 史金柱，杨黎晖，韩晓静，等. 计及宽频带多耦合特性的并网逆变器统一阻抗建模与宽频带稳定性分析[J]. 高电压技术，2025，51(11)：5388-5398.
SHI Jinzhu, YANG Lihui, HAN Xiaojing, et al. Universal impedance modeling and wide-band stability analysis for grid-connected inverters considering wide-band and multi-frequency coupling characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(11): 5388-5398.

[10] 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.

[11] LIU J N, TAO X, YU M, 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.

[12] XUE D H, LIU J J, LIU Z, et al. Modeling and analysis of DC terminal impedance of voltage-source converters with different control modes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5883-5896.

[13] 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.

[14] 康忠健，陈　醒，崔朝丽，等. 基于 ESO 与终端滑模控制的直流配电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报，2018，38(11)：3235-3243.
KANG Zhongjian, CHEN Xing, CUI Zhaoli, et al. Bus voltage control method of DC distribution network based on ESO and terminal sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3235-3243.

[15] 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 Yaoxin, 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.

[16] 周年光，罗华伟，王立娜，等. VSC 抑制含电池储能直流配电系统振荡的阻尼控制及参数计算方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：3020-3030.
ZHOU Nianguang, LUO Huawei, WANG Lina, et al. Damping control and parameter calculation method of VSC for resonance suppression in DC distribution system with battery energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3020-3030.

[17] 姜玉霞，田艳军，李永刚. 背靠背变流器调节器参数及传输功率变化对阻抗稳定特性的影响及其改进控制策略[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2866-2875.
JIANG Yuxia, TIAN Yanjun, LI Yonggang. Influence of back-to-back converter regulator parameters and transmission power variation on impedance stability and improved control strategy[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2866-2875.

[18] GADDALA R K, MAJUMDER M G, RAJASHEKARA K. DC-link voltage stability analysis of grid-tied converters using DC impedance models[J]. Energies, 2022, 15(17): 6247.

[19] 张思东，黄云辉，周党生，等. 弱电网下 VSC 控制环路对直流电压稳定性的影响分析[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2730-2741.
ZHANG Sidong, HUANG Yunhui, ZHOU Dangsheng, et al. Impacts analysis of VSC control loop on DC voltage control stability in weak-grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2730-2741.

[20] NIAN H, YANG J, HU B, et al. Stability analysis and impedance reshaping method for DC resonance in VSCs-based power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3344-3354.

[21] 张泽华，宋桂英，张晓璐，等. 考虑恒功率负载的直流微电网稳定性与鲁棒性控制策略[J]. 电工技术学报，2023，38(16)：4391-4405.
ZHANG Zehua, SONG Guiying, ZHANG Xiaolu, et al. Stability and robustness control strategy of DC microgrid considering constant power load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4391-4405.

[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.

[23] LIU Y F, ZHOU X P, YU H Q, et al. Sequence impedance modeling and stability assessment for load converters in weak grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4056-4067.

[24] 陶　馨. 基于阻抗分析的微电网稳定性研究[D]. 杭州：浙江大学，2018：52-54.
TAO Xin. The stability analysis of microgrid based on impedance modeling and analysis[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2018: 52-54.



张权宝
1992—，男，博士生
研究方向为新能源并网设备稳定性
E-mail: zhangquanbao1227@126.com

ZHANG Quanbao
Ph.D. candidate



唐　芬(通信作者)
1984—，女，博士，副教授，博导
研究方向为电力电子化电力系统建模仿真、变流器控制、振荡机理分析与抑制等
E-mail: fent@bjtu.edu.cn

TANG Fen
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2024-11-26　在线出版日期　2025-06-04　　编辑　何秋萍

附录 A

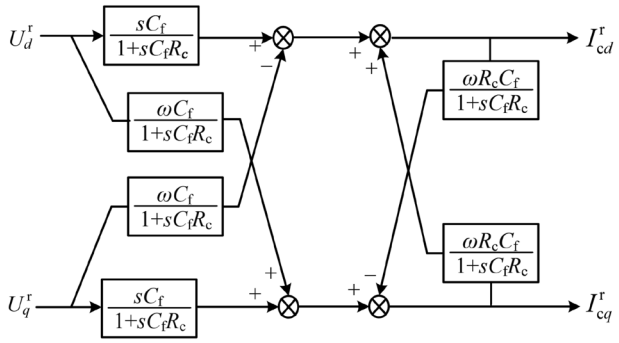


图 A1　滤波电容电压到电容电流之间的耦合关系

Fig.A1　The coupling relationship between filtering capacitor voltage and capacitor current

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}=\begin{bmatrix} sL_{\mathrm{g}} & -\omega_0 L_{\mathrm{g}} \\ \omega_0 L_{\mathrm{g}} & sL_{\mathrm{g}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{f1}}=\begin{bmatrix} sL_1 & -\omega_0 L_1 \\ \omega_0 L_1 & sL_1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{f2}}=\begin{bmatrix} sL_2 & -\omega_0 L_2 \\ \omega_0 L_2 & sL_2 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{A1}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_{\mathrm{v}}=\begin{bmatrix} H_{\mathrm{v}} \\ 0 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} k_{\mathrm{vp}}+\dfrac{k_{\mathrm{vi}}}{s} \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{i}}=\begin{bmatrix} H_{\mathrm{i}} & 0 \\ 0 & H_{\mathrm{i}} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} k_{\mathrm{ip}}+\dfrac{k_{\mathrm{ii}}}{s} & 0 \\ 0 & k_{\mathrm{ip}}+\dfrac{k_{\mathrm{ii}}}{s} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{dec}}=\begin{bmatrix} 0 & -\omega_0(L_1+L_2) \\ \omega_0(L_1+L_2) & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \tag{A2}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_{\mathrm{q1}}=\begin{bmatrix} 0 & L_1 I_{1q} G_{\mathrm{pll}} \\ 0 & -L_1 I_{1d} G_{\mathrm{pll}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{q2}}=\begin{bmatrix} 0 & s(L_{\mathrm{g}}+L_2) I_{2q} G_{\mathrm{pll}} \\ 0 & -s(L_{\mathrm{g}}+L_2) I_{2d} G_{\mathrm{pll}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Y}_{\mathrm{c}}=\begin{bmatrix} \dfrac{sC_{\mathrm{f}}}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} & -\dfrac{C_{\mathrm{f}}\omega_0}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} \\ \dfrac{C_{\mathrm{f}}\omega_0}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} & \dfrac{sC_{\mathrm{f}}}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{qc}}=\begin{bmatrix} 0 & \dfrac{sG_{\mathrm{pll}}(C_{\mathrm{f}}U_q - C_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}(I_{1q}-I_{2q}))}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} \\ 0 & -\dfrac{sG_{\mathrm{pll}}(C_{\mathrm{f}}U_{\mathrm{d}} - C_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}(I_{1d}-I_{2d}))}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{cr}}=\begin{bmatrix} 1 & -\dfrac{C_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}\omega_0}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} \\ \dfrac{C_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}\omega_0}{1+sC_{\mathrm{f}}R_{\mathrm{c}}} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \end{cases} \tag{A3}$$

附录 B

表 B1　多机 CPL 参数(n=3)

Table B1　Parameters of multiple CPLs (n=3)

参数类型	参数名称	数值
CPL 及 DC/DC 参数	输入侧电压 $U_{\mathrm{lv_1}}$、$U_{\mathrm{lv_2}}$、$U_{\mathrm{lv_3}}$/V	86、86、86
	直流母线侧电压 U_{dc}/V	200
	CPL1、CPL2、CPL3 功率/W	600、300、−400
	输入侧电感 L_{cpl}/mH	2.3
	输入侧电容 $C_{\mathrm{lv_1}}$、$C_{\mathrm{lv_2}}$、$C_{\mathrm{lv_2}}$/μF	220、220、220
	直流母线侧电容 $C_{\mathrm{cpl_1}}$、$C_{\mathrm{cpl_2}}$、$C_{\mathrm{cpl_3}}$/μF	73、73、73

表 B2　等效聚合 CPL 参数

Table B2　Equivalent aggregated CPL parameters

参数类型	参数名称	数值
等效聚合 CPL 参数	输入侧电压 U_{lv}/V	150
	直流母线侧电压 U_{dc}/V	200
	CPL 功率/W	500
	输入侧电感 L_{cpl}/μF	2.3
	输入侧电容 C_{lv}/μF	220
	直流母线侧电容 C_{cpl}/μF	220

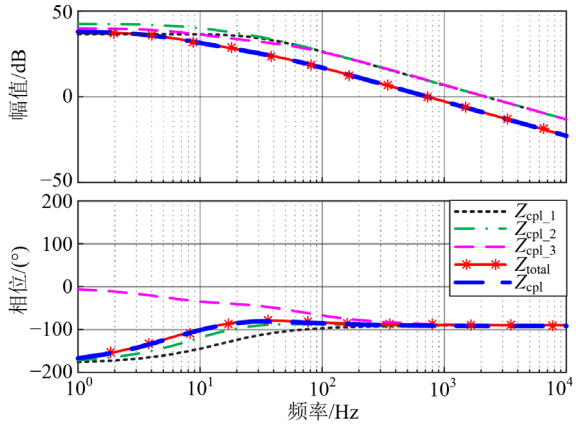


图 B1　多机 CPL 阻抗及聚合 CPL 阻抗

Fig.B1　Impedance of multiple CPLs and equivalent aggregated CPL