第 52 卷 第 5 期：2377-2388 高电压技术 Vol.52, No.5: 2377-2388
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241746

弱电网环境下并网逆变器的临界短路比分析

李 飞[1]，赵佳乐[1]，甘 睿[2]，张 兴[1]，马铭遥[1]
（1. 可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室(合肥工业大学)，合肥 230009;
2. 国网安徽省电力有限公司铜陵供电公司，铜陵 244000）

摘 要：为了明确在弱电网环境下并网逆变器考虑多个约束条件的综合运行范围，首先，分别分析了并网系统基于电压越限、最大功率传输和小信号稳定 3 种约束下的临界短路比(short-circuit ratio，SCR)，并综合三者提出了综合临界短路比(critical short-circuit ratio，CSCR)，同时揭示了制约系统 CSCR 的主要约束条件；然后，采用端电压补偿策略，重新分析了补偿后系统的 CSCR。研究结果表明：在未补偿时，系统的 CSCR 主要受电压越限约束的制约，而针对这一主要限制约束采用端电压补偿策略后，系统仅需考虑小信号稳定约束，CSCR 降低，系统的整体运行范围得以扩大。仿真和半实物实验验证了理论分析的正确性。

关键词：并网逆变器；临界短路比；运行范围；电压越限；功率传输；小信号稳定；端电压补偿

Analysis on Critical Short-circuit Ratio of Grid-connected Inverter Under Weak Grid Environment

LI Fei[1], ZHAO Jiale[1], GAN Rui[2], ZHANG Xing[1], MA Mingyao[1]
(1. National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Grid Connection Technology (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;
2. Tongling Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Tongling 244000, China)

Abstract: In order to clarify the comprehensive operating range of grid-connected inverters under weak grid conditions considering multiple constraints, firstly, we analyzed the critical short-circuit ratio (SCR) of the grid-connected system under three individual constraints, namely, voltage limit violation, maximum power transfer, and small-signal stability. Subsequently, we put forward a comprehensive critical short-circuit ratio (CSCR) by integrating these three constraints, while revealing the dominant constraint determining the system's CSCR. Then, the terminal voltage compensation strategy was adopted to re-evaluate the CSCR of the compensated system. Research results demonstrate that, in uncompensated scenarios, the system's CSCR is mainly constrained by voltage limit violation. After implementing terminal voltage compensation targeting this primary constraint, the system only needs to consider small-signal stability constraints, thus the CSCR is reduced and the overall operating range is expanded. Simulations and hardware-in-the-loop experiments verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: grid-connected inverter; critical short-circuit ratio; operating range; voltage limit violation; power transfer; small-signal stability; terminal voltage compensation

0 引言

随着新能源在电网中的大规模接入，并网逆变器作为新能源与电网之间的能量传输接口得到了广泛应用[1]。然而，由于并网逆变器等电力电子设备非线性特性及线路阻抗的影响，其接入可能导致逆变器在不同电网阻抗条件下难以正常运行，从而缩小其可稳定运行的范围，进而限制可再生能源的进一步发展[2-4]。

在高电网阻抗的弱电网中，逆变器的可运行范围受到多种约束条件的限制，其中小信号稳定性是当前并网系统中备受关注的约束之一。为应对小信号扰动，文献[5]利用电压、功率和频域因子构建电压源换流器(voltage source converter, VSC)的分段仿射阻抗模型，用于动态计算运行分区，从而定位和优化系统的稳定边界。文献[6]提出了一种考虑稳态运行和小信号稳定的并网稳定域计算方法，量化评估了混合直驱风电场在不同构网型机组占比下的电网短路比(short-circuit ratio，SCR)运行范围。目前，小信号稳定性分析通常通过逆变器阻抗扫频获取逆

基金资助项目：国家自然科学基金 (52177175)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177175).

变器阻抗特性，并采用阻抗分析法研究其输出特性[7]。通过小信号稳定的临界条件可确定系统处于临界稳定状态下的 SCR，从而明确并网系统的可运行范围。文献[8]将逆变器和电网视为相互独立的子系统，采用阻抗分析法对电网阻抗与逆变器输出阻抗之比进行研究，分析电网阻抗变化对并网逆变器输出电流稳定性的影响。文献[9]给出了小信号稳定性与 SCR 之间的关系，通过求解关系式的特征值，以获得系统临界稳定时的 SCR，用来表征系统小信号稳定时的临界条件。这些研究仅是基于单一小信号稳定约束条件推导得到的临界条件。

并网系统中不同电网阻抗也会影响公共耦合点(point of common coupling，PCC)的电压稳定性，故有必要研究找到逆变器在极限工况下满足 PCC 电压要求的电网条件，即临界短路比。文献[10]根据复合和加权短路比函数得到了 PCC 电压与 SCR 的关系式，并根据判别式得到系统处于临界稳定情况下的 SCR，然后通过实验减小 SCR，进而观察 PCC 电压的波形，以验证分析结果。文献[11]将临界 SCR 定义为 PCC 电压处于临界稳定状态时对应的 SCR，即在任何大于此 SCR 的并网条件下，PCC 电压均能满足并网要求，在 PCC 电压维持在临界稳定的约束条件下，分析并推导出阻抗比(grid impedance ratio，GIR)与 SCR 之间的数学表达式，得出具体的临界 SCR 指标。除上述约束条件之外，SCR 同样会影响逆变器的功率传输能力。

制约并网逆变器功率传输能力最显著的 2 个因素是交流系统强度和阻抗性质，可用 SCR 来表征[12]。文献[13]指出 SCR 增大可提高新能源并网换流器的静态传输功率极限，然后通过特征根分析法，得到了在不同系统短路比下换流器实际可传输的功率极限。文献[14]在弱电网条件下，分析了基于输出电流闭环控制的换流器传输功率极限，并指出该极限会随电网基频阻抗的增大而减小。文献[15]探讨了逆变器有功功率传输极限与有功电流、系统 SCR 之间的关系，得到了功率传输极限条件下的 SCR 边界。文献[16]研究了当并网逆变器在单位功率因数控制下，为达到额定功率传输并网运行所需要的临界 SCR 条件。文献[17]分析了并网逆变器系统静态功率稳定边界与 SCR 及输出电流之间的关系，SCR 和并网电流会影响输出的有功功率，在满足功率传输的条件下，根据逆变器输出有功功率的关系式可得到基于功率传输约束的临界 SCR。

上述研究以 SCR 为指标量化来评估并网系统运行范围的边界，通常是分别在小信号稳定、并网点电压限制或功率传输能力这 3 种约束条件中的某一种下进行分析，从而得到系统处于临界稳定运行时的 SCR。然而，当同时考虑这 3 种约束条件时，基于单一约束得到的临界 SCR 可能会导致并网逆变器无法保持在正常的运行范围内。

为了解决上述问题，本文对逆变器与电网交互系统的运行范围进行了深入研究，综合考虑了 PCC 电压越限约束、最大功率传输约束和小信号稳定性约束 3 方面因素，提出了并网系统的综合临界短路比(critical short-circuit ratio，CSCR)，同时揭示了制约系统 CSCR 的主要约束条件为电压越限约束。随后，针对主要约束条件，本文采用端电压补偿策略对 PCC 点电压进行补偿，研究了系统在进行补偿后，3 种约束条件之间的关系，并重新分析了补偿后系统的 CSCR，确定其运行范围。最后，通过仿真结果和半实物实验验证了理论分析的正确性。

1 新能源并网系统在弱电网下的临界短路比分析

新能源并网逆变器在弱电网环境下进行并网时，受多个条件约束，其运行范围缩小。若可以得到逆变器在考虑一种或者多种约束条件下系统临界稳定运行的边界条件，并通过临界 SCR 指标量化评估边界条件，则能够明确并网系统的运行范围。故本章主要分别推导得到并网逆变器基于 PCC 电压越限、最大功率传输约束、小信号稳定约束这 3 种约束下的临界 SCR，进而综合三者得到 CSCR。

并网逆变器通常采用电流控制来改善电能质量，因此可视为基频下的受控电流源。同时，电网可以用其戴维南等效电路来表示。因此，新能源并网系统简化主电路如图 1 所示，其中 U_{dc} 为直流侧电压；C_{dc} 为直流侧稳压电容；逆变器侧电感 L_1、网侧电感 L_2 和滤波电容 C_1 构成 LCL 滤波器；I_{pv} 为并网电流；U_{PCC} 为 PCC 处电压；用电阻 R_g 和电

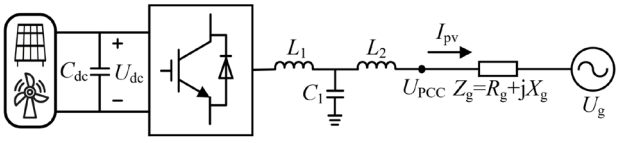


图 1 并网逆变器-电网系统简化电路图

Fig.1 Grid-connected inverter-grid system simplified circuit diagram

抗 X_g 来等效长传输线和升压变压器引入的电网阻抗 Z_g；U_g 为 PCC 处等效电网电压。

定义 SCR 为 PCC 短路容量与连接在该点的电力电子设备额定容量的比值，即：

$$\gamma=\frac{U_g^2}{P_N\sqrt{R_g^2+X_g^2}}=\frac{U_g^2}{R_gP_N\sqrt{1+\eta^2}} \tag{1}$$

式中：γ为短路比 SCR；P_N为并网逆变器在单位功率因数运行下的额定有功功率；$\eta=X_g/R_g$ 为线路的阻抗比 GIR。当并网系统处于临界稳定状态时，此时对应的短路比称为临界短路比。

1.1　基于电压越限的临界短路比分析

线路阻抗通常表现为感性特性，易导致无功功率消耗增加；此时，若无功功率供应不足，则可能引发 PCC 电压下跌，从而超出允许的电压限制范围，该现象即为电压越限。通过分析 PCC 电压的临界条件，可以推导出系统在临界稳定状态下的短路比 $\gamma_{U\text{-min}}$。

并网逆变器线路电压降落ΔU 与注入系统的复功率关系为：

$$\Delta U=\left(R_g+\mathrm{j}X_g\right)\left(\frac{P+\mathrm{j}Q}{U_{PCC}}\right)^* \tag{2}$$

式中：P、Q 为 PCC 注入电网的有功功率、无功功率；上标“*”表示取共轭复数。

结合式(1)对式(2)进行化简可得 PCC 电压跌落的标幺值为：

$$\Delta U_{PCC}=1-\sqrt{\frac{1}{2}\left(1+2\lambda_1+\sqrt{1+4\left(\lambda_1-\lambda_2^2\right)}\right)} \tag{3}$$

式中：$\Delta U_{PCC}=1-U_{PCC}$。λ_1，λ_2的表达式分别为：

$$\begin{cases}\lambda_1=\dfrac{1}{\gamma}\dfrac{1}{|S|}\dfrac{P+\eta Q}{\sqrt{1+\eta^2}}\\ \lambda_2=\dfrac{1}{\gamma}\dfrac{1}{|S|}\dfrac{\eta P-Q}{\sqrt{1+\eta^2}}\end{cases} \tag{4}$$

式中：S 表示 PCC 向电网注入的视在功率。

本文是基于集中式光伏电站进行研究的，其线路阻抗通常为感性，易发生欠压情况。以逆变器发生低压越限为例，参考国家标准 GB/T 37408—2019 规定，光伏并网逆变器 PCC 点电压不得低于 0.9 pu，故定义逆变器输出端口发生低压越限的边界 U_{PCC}=0.9 pu。将边界条件代入式(3)、(4)可求解出基于 PCC 发生低压越限约束的短路比 γ_U 的表达式：

$$\gamma_U=\frac{-6.48\mu_1}{1.2312|S|}+\frac{\mu_2\sqrt{\left(6.48\mu_1\right)^2+9.8496\left(\mu_1^2+\mu_2^2\right)}}{1.2312|S|} \tag{5}$$

其中，μ_1、μ_2的表达式分别为：

$$\begin{cases}\mu_1=\dfrac{P+\eta Q}{\sqrt{1+\eta^2}}\\ \mu_2=\dfrac{\eta P-Q}{\sqrt{1+\eta^2}}\end{cases} \tag{6}$$

观察式(5)、(6)发现，η及 PCC 流向电网的有功功率、无功功率决定了 γ_U 的大小，而逆变器的有功功率 P、无功功率 Q 对应了一个重要参数，即功率因数 F。γ_U 与η、F、逆变器输出有功功率 P 的关系如图 2 所示，3 个子图分别对应不同的控制条件。其中，图 2(a)表示逆变器保持单位功率因数运行且输出有功功率不变时 γ_U 随η 的变化关系；图 2(b)表示逆变器输出有功功率不变且η=∞时 γ_U 随 F 的变化关系；图 2(c)表示逆变器 F=1 且η=∞时 γ_U 随有功功率 P 的变化关系。

由图 2 可以看出，当η趋于无穷大、F 越接近 1、输出功率越大时，γ_U 越大，系统就越容易发生低压越限。此时，在极限工况下，根据式(5)可得基于电压越限约束的 $\gamma_{U\text{-min}}$=2.29。

1.2　基于最大功率传输约束的临界短路比分析

在弱网环境下，并网逆变器的功率传输能力受交流系统强度、阻抗性质以及并网电流等因素的影响。因此，本节主要研究逆变器输出有功功率 P 与并网电流 I_{pv} 和γ之间的关系，并基于最大功率传输约束推导出临界短路比 $\gamma_{P\text{-min}}$。

假设逆变器始终以恒定单位功率因数运行，则逆变器输出的有功功率 P 的表达式为：

$$P=U_{PCC}I_{pv}=\left(\sqrt{U_g^2-\left(X_gI_{pv}\right)^2}+R_gI_{pv}\right)I_{pv} \tag{7}$$

由式(7)可看出，电网阻抗和并网电流会对逆变器输出的有功功率 P 产生影响。若阻抗比η趋于无穷大，即假设电网阻抗为纯感性，则可以得到最恶劣环境下输出 P 的情况[17]。又由式(1)可得，当电网阻抗为纯感性情况时，U_g满足式(8)。

$$U_g^2=\gamma P_NX_g \tag{8}$$

将式(8)代入式(7)可得输出功率 P 与γ和并网电流 I_{pv}之间的表达式为：

$$P=I_{pv}\sqrt{\gamma P_NX_g-\left(X_gI_{pv}\right)^2} \tag{9}$$

基于式(9)，绘制出不同γ下逆变器输出有功功率 P 随着并网电流 I_{pv}的变化趋势，如附录 A 图 A1 所示。

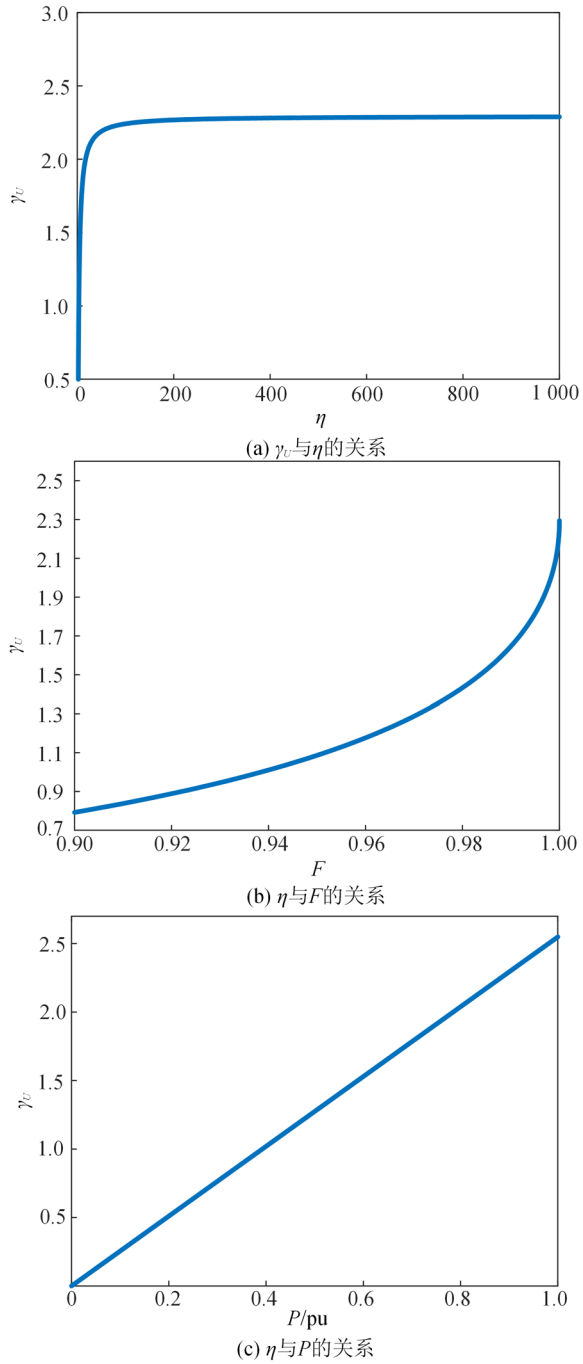


图 2 γ_U 与η、F 和 P 的关系

Fig.2 Relationship between γ_U, η, F and P

由图 A1 可以看出，P 与并网电流 I_{pv} 呈非线性关系，且 P 存在极大值。由式(7)可得并网逆变器输出功率 P 的极大值为：

$$P_{max}=\frac{1}{2-\frac{2}{\sqrt{1+\left(X_g/R_g\right)^2}}}\frac{U_g^2}{\sqrt{R_g^2+X_g^2}} \tag{10}$$

为使并网逆变器能够向电网注入额定有功功率，考虑功率传输约束条件下的临界情况 P_{max}=P_N，将式(10)与表征额定功率 P_N 和短路比γ的关系式(1)联立并代入 P_{max}=P_N，可推导出基于功率传输约束的短路比 γ_P 表达式如式(11)所示。

$$\gamma_P=2-\frac{2}{\sqrt{1+\eta^2}} \tag{11}$$

当系统$\gamma \geq \gamma_P$时，逆变器才可以向电网注入额定功率，从而满足功率传输约束。当γ_P越小时，系统的可运行范围越大。根据式(11)中 γ_P 与η之间的变化关系，需找到满足系统功率传输约束短路比最小的极大值，以代表极限工况下的临界短路比值。当考虑最恶劣情况，即η趋于无穷大时，γ_P达到其最大值 2，将此时的值定为满足系统功率传输约束的临界短路比值，即 $\gamma_{P\text{-min}}$=2。同时，根据式(9)，当η趋于无穷大，γ=2，I_{pv}=$\sqrt{2}$ pu 时，逆变器输出的有功功率 P 可达到最大值 1 pu，并且在此γ下，电网阻抗中只要含有电阻分量，逆变器输出的有功功率最大值都会大于 1 pu。

1.3 基于小信号稳定约束的临界短路比分析

逆变器的阻抗特性会随电压工作点、电流工作点及电网阻抗的变化而变化。通过逆变器阻抗扫频可以获得逆变器的阻抗特性[18]，并采用阻抗分析法对逆变器阻抗与电网阻抗进行研究，从而得到基于小信号稳定性的临界短路比 $\gamma_{S\text{-min}}$。

并网逆变器-电网系统的小信号模型可等效成由电网和理想逆变器 2 个子系统组成，如附录 A 图 A2 所示。并网电流 $I_{pv}(s)$表达式[8]为：

$$I_{pv}(s)=\frac{I(s)-U_g(s)/Z_o(s)}{1+Z_g(s)/Z_o(s)} \tag{12}$$

式中：$I_{pv}(s)$为逆变器等效并网电流；$Z_o(s)$为逆变器输出阻抗。

当电网阻抗呈纯感性时，小信号稳定性最弱，因为纯感性阻抗会导致相位延迟，从而降低系统的相位裕度，增加振荡的风险。所以，考虑电网阻抗为纯感性的最恶劣情况，分析系统在小信号稳定性最弱条件下的稳定边界条件，从而确定系统的可运行范围。

假设并网逆变器和电网 2 个子系统均能单独稳定运行，则并网系统的稳定性取决于式(12)中并网电流 $I_{pv}(s)$的稳定性，即取决于 $1/(1+Z_g(s)/Z_o(s))$。根据阻抗比判据，当电网阻抗与逆变器阻抗的幅值曲线不存在交点，或者交点处的相位差不大于 180°时，系统能够稳定运行，反之系统无法稳定运行[8]，据此，可得系统临界稳定时的小信号稳定边界 $\gamma_{S\text{-min}}$。

当临界短路比越小时，系统可运行范围越大。

由前文分析可得，基于电压越限约束的$\gamma_{U\text{-min}}$=2.29，基于最大功率传输约束的$\gamma_{P\text{-min}}$=2.00。而通常情况下并网逆变器在极弱电网环境下($\gamma<2$)[17]才会发生小信号不稳定。综上所述，系统基于电压越限约束的可运行范围最小，制约系统可运行范围的主要限制因素为电压越限约束。

2　考虑端电压补偿的弱电网场景临界短路比分析

根据第 1 章的分析，电压越限约束是制约系统可运行范围的主要因素，故本章针对电压越限约束这一主要限制因素，采用端电压补偿策略对并网点电压进行补偿。在 PCC 点向电网输送一定容量的无功功率可以有效解决电压越限的问题，根据式(3)、式(4)可以得出 PCC 点电压与有功、无功功率之间的关系图，如附录 A 图 A3 所示。由图 A3 可看出，当 PCC 点提供的无功功率不足时，可能会面临低压越限的风险，如图中低压越限临界点 A_1，此时注入无功功率使逆变器运行到 B_2 点，而随着有功功率的进一步增加，电压再次降低到临界点 B_1，从而再次出现发生低压越限的可能。此时，再次注入足够的无功功率，就可将电压提升至 C_2 点，从而使得 PCC 点电压进一步抬升，以满足并网要求。

本章所采用的端电压补偿策略是通过晶闸管投切电容器(thyristor-switched capacitor，TSC)作为无功补偿设备。TSC 具有良好的动态调节特性，实际运行过程中无功补偿量会根据系统需求实时调整。TSC 通过对并网电压的闭环控制，动态调整无功输出，从而调整投切电容器组数量，实现快速无功补偿，以稳定并网点电压，当并网点电压下降时，需要无功功率补偿来抬升电压，TSC 增加投切电容器数量，抬升并网点电压，反之亦然。

通过上述无功补偿方式，能够使得并网点电压稳定在 1 pu，避免了电压越限。同时，由式(7)可看出，当满足 U_{PCC}=1 pu 时，逆变器的极限输出有功功率始终能达到 1 pu，从而满足功率传输约束。

附录 A 图 A4 为并联电容器无功补偿时，系统电路的小信号模型。根据图 A4 所示的小信号模型，将并联补偿电容器看作是电网阻抗的一部分，新的电网阻抗 $Z_{\text{gnew}}(s)$等效为 $1/(sC_{\text{q}})$与 $Z_{\text{g}}(s)$并联，其表达式为 $Z_{\text{g}}(s)/(Z_{\text{g}}(s)sC_{\text{q}}+1)$。采用 1.3 节中所提分析方法，根据阻抗比判据，并网系统的稳定性取决于 $1/(1+Z_{\text{gnew}}(s)/Z_{\text{o}}(s))$，而电网阻抗发生了改变，所以需要重新分析系统的小信号稳定性边界。

3　仿真测试

在 Simulink 中搭建逆变器模型，对前述分析所得的基于电压越限约束、功率传输约束、小信号稳定约束的临界短路比，以及端电压补偿后得到的临界短路比，分别进行仿真测试。逆变器相关参数如附录 A 表 A1 所示，采用的控制结构为典型三相 LCL 型并网逆变器控制结构。

3.1　电压越限约束临界短路比验证

将电网阻抗设置为纯感性，逆变器始终以单位功率因数、额定输出电流运行，通过不断减小γ值来判断 PCC 点发生低压越限时的临界短路比。仿真结果如图 3 所示，由图 3 可以看出，当γ=2.29 时，U_{PCC}=0.9 pu，当$\gamma<2.29$ 之后，$U_{\text{PCC}}<0.9$ pu。仿真结果与 1.1 节中理论推导所得基于电压越限约束的$\gamma_{U\text{-min}}$=2.29 结果一致，验证了理论推导的正确性。

3.2　最大功率传输约束临界短路比验证

在 Simulink 中通过不断增加并网逆变器的输出电流，用来测试$\gamma_{P\text{-min}}$的准确性。在进行仿真测试时发现，令并网逆变器 d 轴电流指令值为 1.2 节中所述值，$I_{\text{pv}}=\sqrt{2}$ pu 时，即 60 A，在$\gamma<2.9$ 之后，系统总是不满足小信号稳定性。为了忽略小信号稳定性的影响，在测试中用恒定电流源代替逆变器。将电网阻抗设置为纯感性即$\eta=\infty$且γ=2，同时保持逆变器单位功率因数运行。改变电流源输出电流大小后，PCC 流向电网的有功功率标幺值 P 如图 4 所示。根据图 4 可以看出，当输出电流 I_{pv}=1.41 pu 时，P 输出最大，约为 1 pu，与 1.2 节中理论分析基本一致。

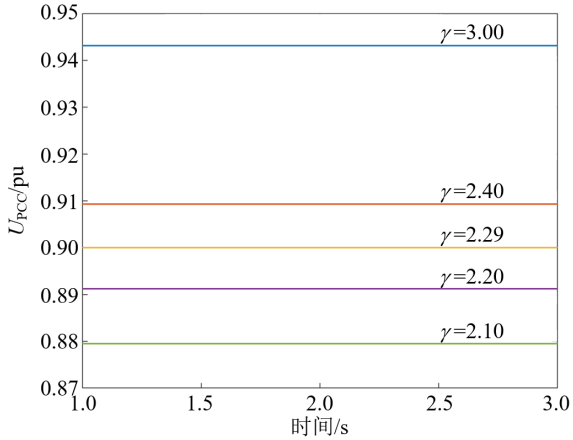


图 3　不同短路比大小下 PCC 电压幅值

Fig.3　Voltage amplitude at PCC under different γ

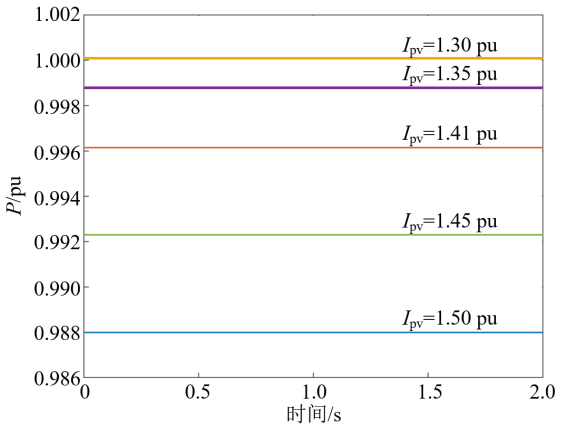


图 4 不同输出电流下由 PCC 流向电网的有功功率

Fig.4 Active power flowing from PCC to grid under different output currents

为了验证 1.2 节中基于最大功率约束临界短路比的正确性，在不同的γ下，不断改变输出电流，得到的最大输出功率仿真结果如表 1 所示，可以得出测试值与理论值基本一致。因此，逆变器以单位功率因数运行时，基于最大功率传输约束的$\gamma_{P\text{-min}}$=2。

3.3 小信号稳定约束临界短路比验证

对所搭建的逆变器进行逆变器阻抗扫频来获取其阻抗特性，逆变器阻抗曲面与电网阻抗曲面图如附录 A 图 A5 所示，在图中标出相位差值大于 180°的交点。两阻抗幅值曲面 *X*-*Y* 投影图与相位差如图 5 所示，由图 5 可以看出，在$\gamma \le 1.85$之后，交点一直存在。因此当$\gamma \le 1.85$时，系统不稳定；当$\gamma > 1.85$时，系统稳定。所以，基于小信号稳定约束的临界短路比$\gamma_{S\text{-min}}$=1.85。

在 Simulink 中通过不断减小γ以寻找小信号稳定的临界短路比，从而验证所预测的小信号稳定边界的准确性。图 6 为小信号稳定约束下不同短路比大小对应的逆变器输出三相电流 I_{abc} 波形，根据图 6 可以看出，γ=1.87 时，逆变器输出电流为良好的正弦波，γ减小为 1.86 后，电流波形畸变严重。无端电压补偿的仿真结果$\gamma_{S\text{-min}}$=1.87 与建模预测结果有 0.02 的误差，在容许范围内，可认为仿真结果与理论建模分析结果基本一致。

综上仿真分析，并网逆变器-电网交互系统中，逆变器以单位功率因数运行，且无端电压补偿措施时，各理论分析与仿真结果如表 2 所示。可知：1）当系统$\gamma \ge 2.29$时，能够满足电压越限约束；2）当系统$\gamma \ge 2.00$时，能够满足功率传输约束；3）当系

表 1 不同短路比大小下的最大输出功率

Table 1 The P_{max} under different γ

γ	I_{pv} 测试值/pu	P_{max} 数值/pu
2.25	1.59	1.125 1
2.00	1.41	1.000 1
1.75	1.24	0.875 1
1.50	0.88	0.625 0

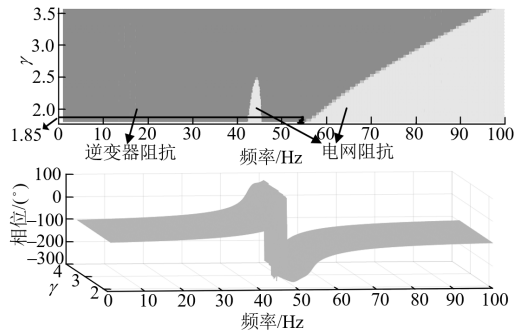


图 5 幅值曲面 *X*-*Y* 投影图与两阻抗相位差

Fig.5 Amplitude surface *X*-*Y* projection and phase difference between two impedances

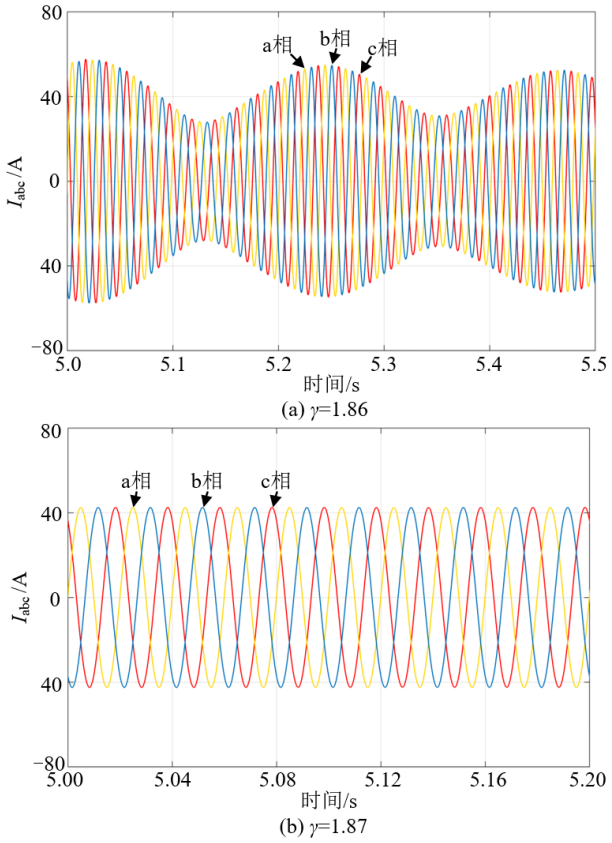


图 6 小信号稳定约束下不同短路比对应的逆变器输出电流波形

Fig.6 Inverter output current waveforms corresponding to different γ under small signal stability constraints

表 2　逆变器单位功率因数运行时临界短路比理论值与测试值

Table 2　Theoretical and tested values of critical γ when inverter operates at unity power factor

临界短路比	理论值	测试值
$\gamma_{U\text{-min}}$	2.29	2.29
$\gamma_{P\text{-min}}$	2.00	2.00
$\gamma_{S\text{-min}}$	1.85	1.87

统$\gamma \geq 1.85$ 时，能够满足小信号稳定约束。

为使系统能够同时满足 3 种约束条件，取三者中运行范围最小，即临界短路比值最大者作为系统的 CSCR。由此可得，该并网系统的 CSCR=2.29，即当系统的$\gamma \geq 2.29$ 时，其各约束要求均能满足。并且发现，此时系统的 CSCR 主要受电压越限约束的制约，逆变器最容易发生电压越限而脱网。

3.4　考虑端电压补偿的临界短路比验证

根据第 2 章分析，本文采用 TSC 方法进行端电压补偿。而本文所分析的情况均为系统在不同短路比下进行补偿后达到稳态时能够使 PCC 点电压近似为 1 pu，这一极限工况对应工作点所需的补偿容量，即在稳态时，假设经过 TSC 闭环控制后，PCC 电压稳定在 1 pu，此时，TSC 所需要投入的电容容值 C_q。故可通过将 U_{PCC}=1 pu 代入式(3)、(4)计算得出 C_q 值，计算结果如附录 A 表 A2 所示。

对并联电容器容量的准确性进行测试，在 MATLAB/Simulink 中测试了不同短路比大小下的 PCC 电压、流向电网的有功功率、无功功率，结果如附录 A 表 A3 所示，由表 A3 结果可得，上述方法基本可以实现 PCC 电压稳定在 1 pu。

通过测试发现补偿后的 PCC 电压和输出有功功率均能够稳定在 1 pu 左右，所以不再需要考虑电压越限约束和最大功率传输约束，仅需考虑基于小信号稳定约束下的临界短路比，以此作为系统的 CSCR，所以需要重新分析系统的小信号稳定边界。对并联电容器下并网系统的逆变器进行阻抗扫频获取其阻抗特性，端电压补偿后逆变器阻抗曲面与电网阻抗曲面图如附录 A 图 A6 所示，在图中标出相位差值大于 180° 的交点。两阻抗幅值曲面 *X*-*Y* 投影图与相位差如图 7 所示，观察图 7 发现，在$\gamma \leq 2.10$ 之后表示不稳定的交点一直存在。因此，当$\gamma \leq 2.10$ 时，系统不稳定；当$\gamma > 2.10$ 时，系统稳定。此时，系统基于小信号稳定约束的临界短路比$\gamma_{S\text{-min}}$ =2.10。

使用电容器补偿 PCC 点电压后的逆变器输出电流波形如图 8 所示，当γ=2.06 时，逆变器输出电流为良好的正弦波，当γ减小为 2.05 时，逆变器输出电流波形畸变严重。因此仿真得到的$\gamma_{S\text{-min}}$ =2.06，与建模预测的基于小信号稳定的临界短路比有 0.04 的误差，在容许范围内，认为仿真结果与理论建模分析结果基本一致。

采用端电压补偿后的理论分析结果与仿真结

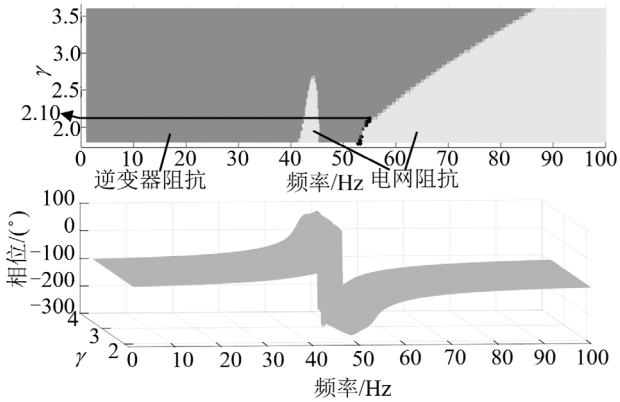


图 7　端电压补偿后幅值曲面 *X*-*Y* 投影图与两阻抗相位差

Fig.7　Amplitude surface *X*-*Y* projection and phase difference between two impedances after terminal voltage compensation

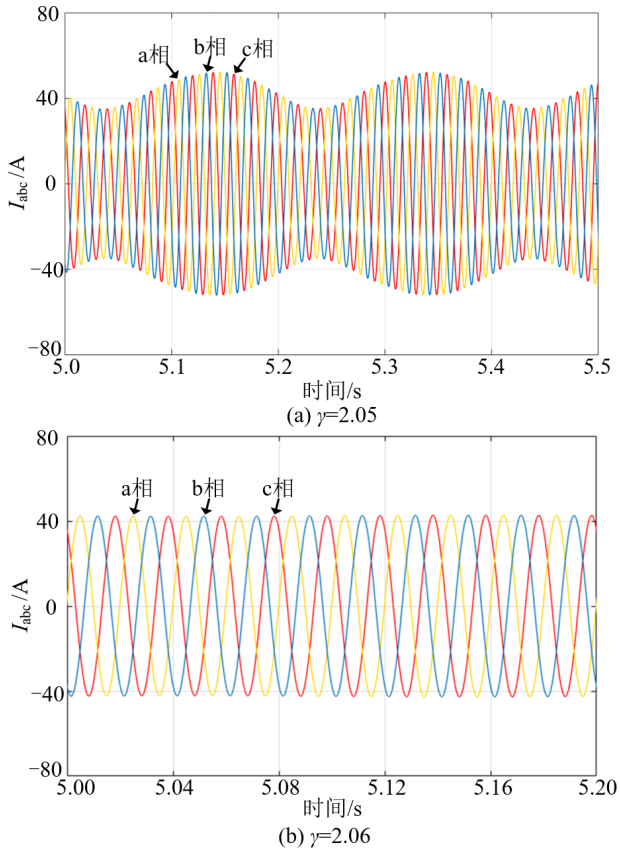


图 8　端电压补偿后不同短路比下逆变器的输出电流波形

Fig.8　Output current waveform of the inverter under different γ after terminal voltage compensation

果如表 3 所示，此时系统的综合临界短路比为 2.10。通过对比补偿前后基于小信号稳定性的临界短路比可以发现，相对于没有补偿之前，小信号稳定性减弱，但对系统整体而言其 CSCR 减小，可运行范围增大。

4 基于 RTU-BOX 和 RT-LAB 的半实物实验

按照附录 A 表 A1 的参数搭建基于 RTU-BOX 和 RT-LAB 的硬件在环实验平台，其原理示意图见图 9，根据所搭建的实验平台分别对没有端电压补偿情况下基于电压越限约束、最大功率传输约束、小信号稳定约束的 3 种临界短路比进行实验验证，并对考虑端电压补偿后的临界短路比进行实验验证。

在 3.2 节的分析中可知，在功率传输的仿真中，令逆变器 d 轴电流指令值为 60 A 时，在$\gamma<2.9$ 之后逆变器会发生小信号不稳定，在进行半实物实验时，在$\gamma<2.9$ 后同样发生小信号不稳定，无法获取γ=2 时逆变器的功率输出情况，因此无法通过半实物验证基于最大功率传输约束的 $\gamma_{P\text{-min}}$。故本章仅对电压越限约束以及小信号稳定约束 2 种条件进行半实物验证。

4.1 无端电压补偿时并网系统临界短路比半实物验证

4.1.1 电压越限约束临界短路比半实物验证

由 1.1 中的理论推导可知，当γ<2.29 时，PCC 电压幅值小于 0.9 pu，即相电压有效值小于 198 V。在半实物仿真平台中，对γ=2.2、γ=2.3 分别进行仿真，得到 PCC 的三相电压波形如图 10 所示。

图 10(a)中 a、b、c 三相电压有效值分别为 194.868、195.246、195.109 V；图 10(b)中 a、b、c 三相电压有效值分别为 197.609、197.922、197.579 V。观察图 10 可以发现，γ=2.3 时，PCC 点相电压有效值约为 198 V，当γ减小为 2.2 时，有效值约为 195 V，已经小于 0.9 pu。由于采样等原因，实验结果存在些许误差，但在容许范围内，故实验结果与理论分析的 $\gamma_{U\text{-min}}$ =2.29 基本一致。

4.1.2 小信号稳定约束临界短路比半实物验证

由 3.3 节可知，在进行端电压补偿前，基于小信号稳定约束的 $\gamma_{S\text{-min}}$ =1.85。通过不断多次减小γ进行半实物仿真验证后，展示出γ=1.9、γ=1.85 时逆变器输出的三相电流波形如图 11 所示。

经过多次半实物仿真实验后，结果显示，当γ<1.9 时，输出电流波形畸变，系统失稳；当γ=1.9 时，输出电流为良好的正弦波，系统保持稳定。由于采样等原因，实验结果存在些许误差，但在容许范围内，故实验结果与前文分析预测小信号临界短

表 3 端电压补偿后的小信号临界短路比理论值与测试值

Table 3 Theoretical and tested values of small-signal critical γ obtained by terminal voltage compensation

参数	临界短路比理论值	临界短路比测试值
数值	2.10	2.06

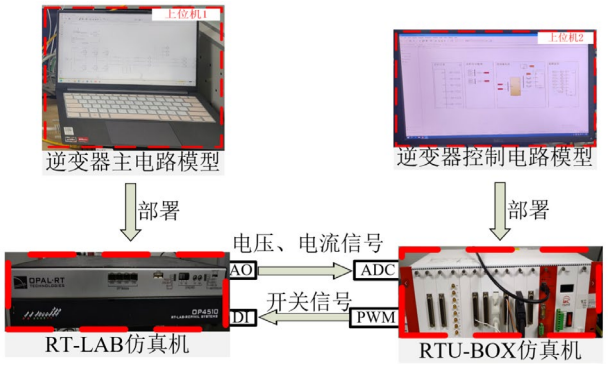
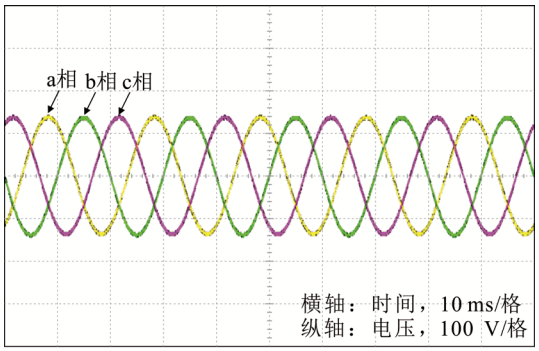
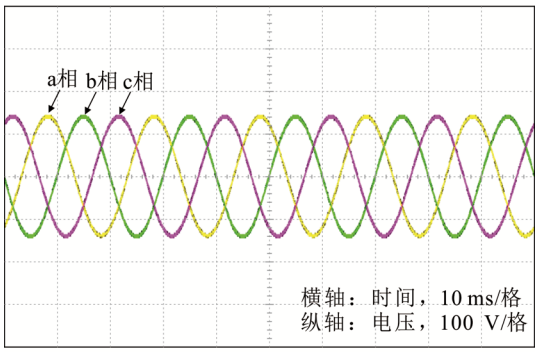


图 9 半实物实验原理示意图

Fig.9 Schematic diagram of hardware-in-the-loop (HIL) simulation principle



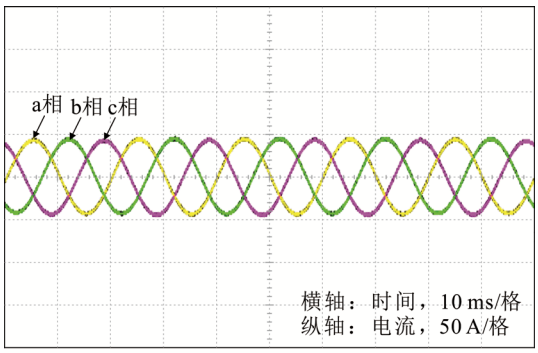
(a) γ=2.2



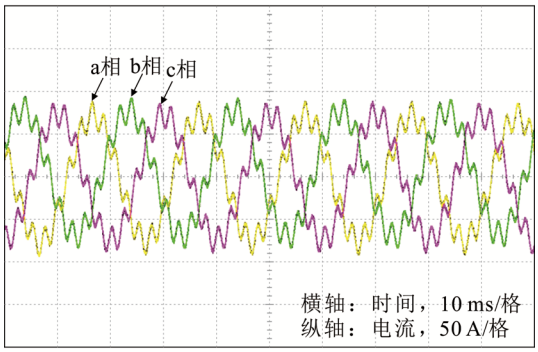
(b) γ=2.3

图 10 γ取 2.2、2.3 时 PCC 三相电压波形

Fig.10 Three-phase voltage waveform at PCC with γ of 2.2 and 2.3



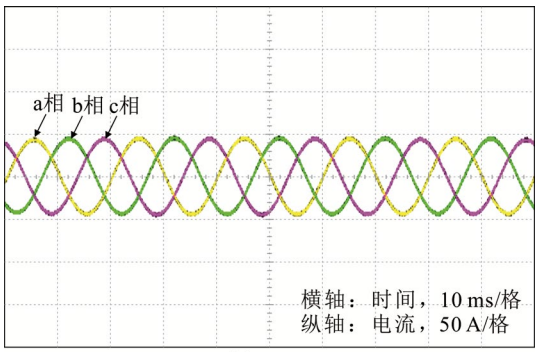
(a) γ=1.9



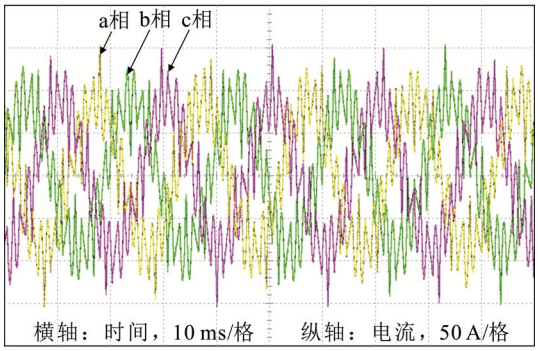
(b) γ=1.85

图 11　γ取 1.9、1.85 时逆变器输出三相电流波形

Fig.11　Three-phase output current waveform of inverter with γ of 1.9 and 1.85



(a) γ=2.3



(b) γ=2.25

图 12　端电压补偿下γ取 2.3、2.25 时 PCC 三相电流波形

Fig.12　Three-phase current waveform at PCC under terminal voltage compensation with γ of 2.3 and 2.25

路比基本一致。

4.2　考虑端电压补偿的临界短路比半实物验证

由 3.4 节可知，在进行端电压补偿后，基于小信号稳定约束的$\gamma_{S\text{-min}}$=2.10。经过多次半实物仿真实验后，得到γ=2.3、γ=2.25 时输出三相电流波形图如图 12 所示。

结果显示，当γ<2.3 时，逆变器输出电流畸变，系统失稳；当γ=2.3 时，输出电流为良好的正弦波，系统稳定。由于半实物仿真平台存在延时及实验采样等原因，实验所得基于小信号稳定约束的临界短路比与前述仿真结果之间存在微小误差，但在容许范围内，认为实验结果与前文分析基本一致。

5　结论

1）研究发现，在未采取补偿措施条件下，当系统以单位功率因数运行时，满足电压越限约束的临界短路比为$\gamma_{U\text{-min}}$=2.29，为 3 种约束中最严格的限制条件；而最大功率传输约束与小信号稳定约束对应的临界短路比分别为$\gamma_{P\text{-min}}$=2.00 和$\gamma_{S\text{-min}}$=1.85。综合三者得到系统的 CSCR 为 2.29。量化评估了弱电网环境下并网系统的运行范围边界，并指出此时系统运行范围主要受 PCC 电压越限约束的限制，逆变器此时最易因电压越限而脱网。

2）针对电压越限而导致系统的运行范围受限，本文采用端电压补偿策略，并分析了补偿后系统的运行范围，结果表明：补偿后，与未采用补偿时主要受电压越限制约的 CSCR 相比，此时 CSCR 主要受小信号稳定性约束条件的制约，因此只需关注小信号稳定性对系统 CSCR 的影响，其他 2 种约束条件均能满足。进一步研究发现，尽管进行端电压补偿后的系统小信号稳定性有所减弱，但系统的 CSCR 由 2.29 降低至 2.10，整体运行范围扩大。

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

参考文献　References

[1] 王继磊，张　兴. 多逆变器并联系统暂态稳定性分析及其暂态电流注入策略[J]. 高电压技术，2025，51(1)：390-400.
WANG Jilei, ZHANG Xing. Transient stability analysis and transient current injection strategy of multi-inverter parallel system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 390-400.

[2] 许津铭，凌子涵，程　成，等. 并网逆变器非线性特性建模及稳定性研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(1)：370-386.
XU Jinming, LING Zihan, CHENG Cheng, et al. Overview on nonlinear modeling and stability analysis of grid-tied inverters[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 370-386.

[3] 李　明，常永康，毛永涛，等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术，2024，50(11)：

4773-4788.
LI Ming, CHANG Yongkang, MAO Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773-4788.

[4] 赵雨童，高 飞，俞嘉浩，等. 弱电网下 VSC 的多维度建模及稳定性分析[J]. 高电压技术，2022，48(1)：220-231.
ZHAO Yutong, GAO Fei, YU Jiahao, et al. Multi-dimensional modeling and stability analysis of VSC connecting to weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 220-231.

[5] 马悦鑫，王 鹏，赵浩然，等. 基于分段仿射阻抗模型的电压源变流器小扰动稳定域在线构造[J]. 中国电机工程学报，2024，44(14)：5667-5679.
MA Yuexin, WANG Peng, ZHAO Haoran, et al. Online construction of small-signal stability region of voltage source converters based on piecewise affine impedance model[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5667-5679.

[6] 苟少云，郭春义. 构网型与跟网型混合直驱风电场并网稳定域分析[J]. 电力系统自动化，2025，49(2)：73-83.
GOU Shaoyun, GUO Chunyi. Grid-connection stability domain analysis for wind farms with hybrid direct-drive grid-forming and grid-following wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 73-83.

[7] 陈 新，王赟程，龚春英，等. 采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报，2018，38(7)：2082-2094.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.

[8] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.

[9] ZHOU Y H, XIN H H, WU D, et al. Small-signal stability assessment of heterogeneous grid-following converter power systems based on grid strength analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2566-2579.

[10] BRYANT J S, MEEGAHAPOLA L, MCGRATH B, et al. Assessing the critical stability limits of multi-infeed inverter-based generator grid connections: an analytical approach[C]//Proceedings of 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2022: 1-5.

[11] YU L, SUN H D, XU S Y, et al. A critical system strength evaluation of a power system with high penetration of renewable energy generations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 710-720.

[12] ZHOU J Z, GOLE A M. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics[C]//Proceedings of the 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, United Kingdom: IET, 2012: 1-6.

[13] 赵欣玥. 弱电网下新能源并网变换器可传输的极限功率及控制器参数优化设计[D]. 武汉：华中科技大学，2021.
ZHAO Xinyue. Maximum available power of renewable-energy grid-connected converter under weak grid conditions and optimal design of controller parameters[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[14] 康 勇，林新春，郑 云，等. 新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J]. 中国电机工程学报，2020，40(14)：4506-4515.
KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4506-4515.

[15] 康 勇，林新春，潘 辰，等. 弱电网下采用 SVC 与 SVG 补偿后新能源并网变换器的功率传输特性分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2115-2124.
KANG Yong, LIN Xinchun, PAN Chen, et al. Analysis of power transmission characteristics of renewable energy grid-connected converter considering SVC and SVG compensation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2115-2124.

[16] 于彦雪，胡鹏飞，陈玉树，等. 极弱电网下并网逆变器功率传输能力分析及提升方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(14)：101-108.
YU Yanxue, HU Pengfei, CHEN Yushu, et al. Analysis and improvement method of power transfer capability for grid-connected inverter in ultra-weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14): 101-108.
YANG D S, WANG X F, LIU F C, et al. Adaptive reactive power control of PV power plants for improved power transfer capability under ultra-weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1269-1279.

[17] 吴 旭，王 伟，肖华锋，等. 并网逆变器整体序阻抗建模方法及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2024，44(9)：3645-3655.
WU Xu, WANG Wei, XIAO Huafeng, et al. Overall sequence impedance model of grid-connected inverter and its stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3645-3655.

[18] 余紫薇，孙 丹，刘一鸣，等. 风电制氢系统阻抗建模及振荡特性分析[J]. 高电压技术，2024，50(1)：169-181.
YU Ziwei, SUN Dan, LIU Yiming, et al. Impedance modeling and oscillation characteristic analysis of hydrogen production system by wind power[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 169-181.



李 飞(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要从事新能源发电变流系统稳定性分析与谐振抑制、可再生能源制氢系统电-氢耦合控制策略等方面的研究工作
E-mail: sandflylf@qq.com

LI Fei
Ph.D., Professor
Corresponding author



赵佳乐
2001—，男，硕士生
主要从事新能源并网逆变器控制泛化能力评估的研究工作
E-mail: 2283751141@qq.com

ZHAO Jiale

收稿日期 2024-10-29 在线出版日期 2025-04-28 编辑 何秋萍

附录 A

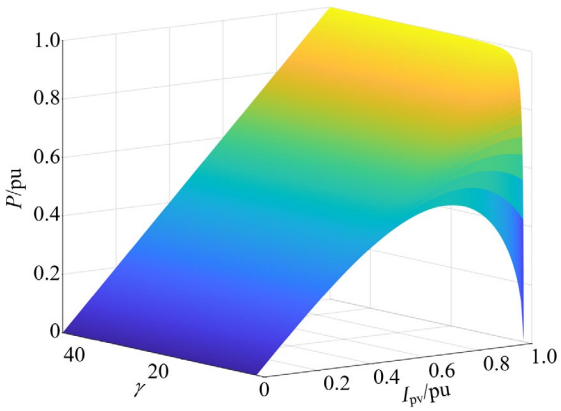


图 A1　P 与 I_{pv}、γ 之间的关系

Fig.A1　Relationship between P, I_{pv}, and γ

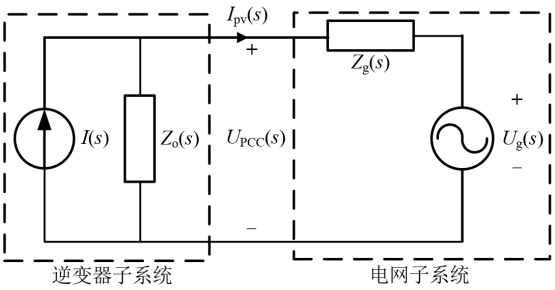


图 A2　逆变器-电网系统的小信号模型

Fig.A2　Small-signal model of grid-connected inverter-grid system

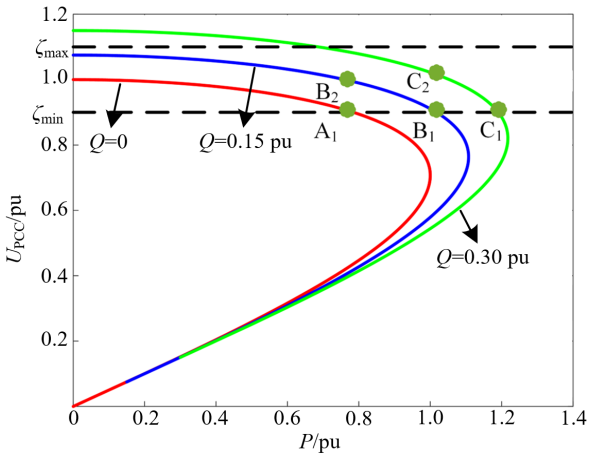


图 A3　PCC 点电压与有功、无功功率的关系

Fig.A3　Relationship between U_{PCC}, P, and Q

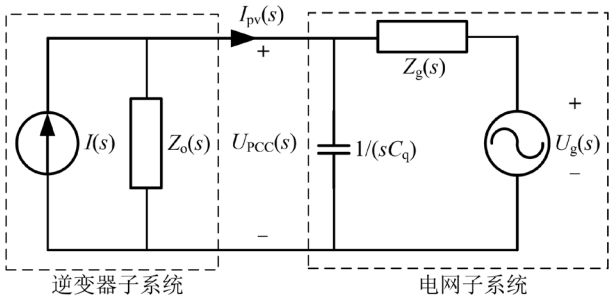


图 A4　并联电容器无功补偿的系统小信号模型

Fig.A4　Small signal model of the system with shunt capacitor reactive compensation

表 A1　逆变器主电路和控制电路的参数

Table A1　Parameters of the main circuit and control circuit of the inverter

参数	符号	数值
逆变器直流测电压/V	U_{dc}	800
电网相电压/V	U_g	220
d 轴指令电流/A	I_{dref}	$30\sqrt{2}$
q 轴指令电流/A	I_{qref}	0
锁相环比例系数	K_{pPLL}	0.071 4
锁相环积分系数	K_{iPLL}	2.243 1
电流环比例系数	K_p	4
电流环积分系数	K_i	200

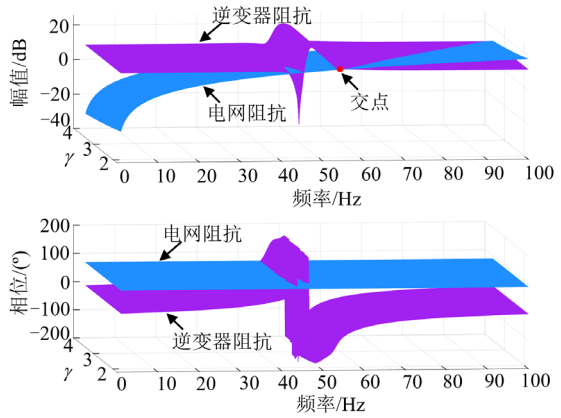


图 A5　考虑电网阻抗影响的并网逆变器阻抗与电网阻抗图

Fig.A5　Impedance of grid connected inverters considering the impact of grid impedance and grid impedance diagram

表 A2　不同短路比大小下对应所需并联的电容器容量

Table A2　Required parallel capacitor value for different γ

γ	$C_q/(10^{-4}\ \mathrm{F})$	γ	$C_q/(10^{-5}\ \mathrm{F})$
2.04	1.136 7	2.70	8.333 4
2.05	1.130 3	3.00	7.446 4
2.06	1.124 1	3.30	6.734 2
2.10	1.099 7	3.60	6.148 9
2.40	0.947 2	3.90	5.658 8

表 A3　并联电容器无功补偿容量的准确性测试

Table A3　Accuracy test of reactive compensation capacity of parallel capacitors

γ	U_{PCC}/pu	P/pu	Q/pu
2.1	1.000 6	1.000 6	0.254 3
2.4	1.000 1	0.999 2	0.217 7
2.7	0.999 8	0.999 9	0.191 3
3.0	1.000 4	1.000 2	0.172 0
3.3	1.000 1	1.000 4	0.155 2
3.6	1.000 0	0.999 8	0.141 9
3.9	1.000 2	1.000 1	0.130 5

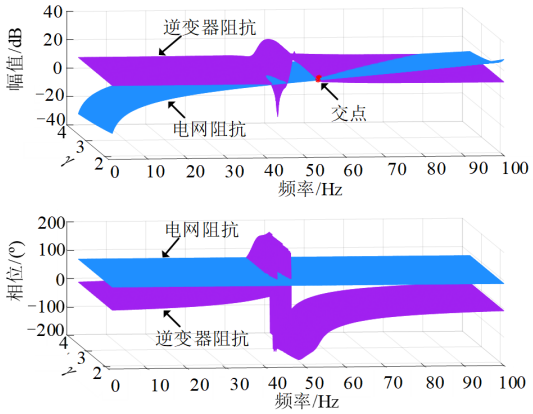


图 A6　端电压补偿下的逆变器阻抗与电网阻抗图

Fig.A6　Impedance diagrams of inverter and grid under terminal voltage compensation with parallel capacitor