第 50 卷 第 1 期：394-411 高电压技术 Vol.50, No.1: 394-411
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221566

基于双重稳定约束的屋顶光伏逆变器分布式阻尼重构方案

齐 磊[1]，赵 巍[1]，孙孝峰[1]，李 昕[1]，翟燕飞[2]
（1. 燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室，秦皇岛 066004；
2. 国网秦皇岛供电公司，秦皇岛 066004）

摘 要：为了解决屋顶光伏逆变器谐波谐振导致的渗透率提高受限问题，提出了一种基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案。首先，基于多逆变器等效阻抗模型，分析了强网弱化特性与渗透率之间的耦合关系及谐振易发机理；然后，以强网弱化下谐波谐振为约束，探究了差异化调控出力及台数下的新能源渗透率特性；其次，考虑调控经济性，通过在底层逆变器调制波中叠加额外阻尼等效控制量，提出了分布式阻尼重构方案，并结合系统谐波谐振抑制及自身稳定的双重稳定约束要求，构建了基于系统级阻抗匹配及底层零极点的分布式阻尼极限重构能力评估方案，以实现渗透率的最大提高；最后，通过仿真和实验验证了所提方案的有效性。研究结果表明，所提方案可提高逆变器的谐波谐振抑制能力及并网系统的渗透率水平，为屋顶光伏大规模接入提供技术保障。
关键词：屋顶光伏；渗透率；强网弱化；谐波谐振；双重稳定约束；阻尼重构极限

Distributed Damping Reconstruction Control Scheme of Rooftop Photovoltaic Inverters Based on Dual Stability Limitations

QI Lei[1], ZHAO Wei[1], SUN Xiaofeng[1], LI Xin[1], ZHAI Yanfei[2]
(1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation & Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. State Grid Qinhuangdao Power Supply Company, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: To solve the limitation of the penetration improvement caused by harmonic resonance of rooftop photovoltaic inverters, a distributed damping reconstruction control scheme based on dual stability limitations is proposed. Firstly, the coupled relationship between the grid strength and penetration, and the harmonic resonance mechanism were investigated based on the equivalent impedance model of multi-parallel inverters. Secondly, the harmonic resonance under grid weakening was taken as a constraint, and the penetration characteristics of new energy under different dispatched power and number of units were analyzed. Thirdly, the economy of the power dispatch was taken into account, and the equivalent control component of the extra damping was added into the modulation wave of the bottom inverter to form the distributed damping reconstruction control scheme. Moreover, the dual stability limitation requirements of harmonic resonance suppression and the self-stability were taken into account, and an evaluation scheme of the maximum ability of the distributed damping reconstruction was constructed based on the impedance matching and pole-zero diagram, so as to realize the maximum improvement of the penetration level. Finally, the effectiveness of the proposed control scheme was verified by simulations and experiments. The research results show that the proposed control scheme can improve the harmonic resonance suppression ability of the inverters and the penetration level of the grid-connected system, providing a technical support for the large-scale integration of rooftop photovoltaics.
Key words: rooftop photovoltaic; penetration; grid weakening; harmonic resonance; dual stability limitations; maximum damping reconstruction

基金资助项目：河北省重点研发计划(19214405D)；河北省自然科学基金(E2021203162)。
Project supported by Key Research and Development Program of Hebei Province (19214405D), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2021203162).

0　引言

能源结构转型背景下，构建新型电力系统是实现“碳达峰·碳中和”的重要举措，传统电力系统逐渐呈现高渗透率新特征[1-3]。IEC 62934—2021 定义渗透率为区域电网中新能源发电额定功率与所有发电单元额定功率之比，主要用于评估区域电网新能源发电的利用水平[4]。随着电力系统负荷侧大规模分布式新能源发电单元通过电力电子装置接入低压配电网，分布式新能源发电单元出力的随机性及电力电子装置的多环路快速响应特性导致高渗透率新能源系统源网端交互频繁、运行形态复杂，给电力系统的安全稳定运行带来了新的挑战[5-8]。因此，对电力电子化电力系统新能源渗透率边界进行评估，对电网安全调度、稳定运行具有重要意义。

基于高比例新能源发电系统电压频率稳定要求，文献[9]通过构建新能源并网发电系统等值阻抗，以静态电压稳定裕度 8%为约束，评估了区域电网新能源的临界渗透率。文献[10]建立了含频率特征的高渗透率发电系统传递函数，分析了新能源主导的发电系统在不同渗透率下的频率响应能力，以频率稳定为约束评估了新能源渗透率边界。此外，新能源发电单元通常经长线路传输、变压器升压后并网，网侧体现等效电感特性，新能源渗透率的提高会导致网侧等效阻抗变大，从而衍生强网弱化谐振频发的新现象[11-13]。为揭示强网弱化后源网交互谐波谐振的产生机理，文献[14]针对单机并网系统建立了并网逆变器与电网的等效阻抗模型，采用阻抗分析法分析了网侧等效阻抗变化即电网强弱与谐波谐振之间的关系。文献[15]推导了 n 台逆变器的数学模型，分析了逆变器并网台数对并网电流谐波特性的影响，随着逆变器装机容量的增加，并网点电压电流将产生谐波，且畸变严重。因此，除受电网电压、频率的传统约束外，强网弱化后衍生的谐波谐振也成为高比例新能源发电系统渗透率水平提高的重要制约因素之一。

为改善高渗透率发电系统强网弱化后的谐波谐振问题，文献[16-17]提出一类集中式有源阻尼控制器，以改善高渗透电网中的谐波抑制问题。但上述集中式有源阻尼方案的实现需在并网点处额外安装阻抗适配变换器，从而增加了系统规划成本。为提高系统建设的经济性，关于逆变器级谐振抑制方案的研究颇为广泛。文献[18]通过在电压前馈通道中串入多谐振环节，构建了适用于特征谐波消除的自适应改进方案。文献[19]将带通滤波器引入电压前馈环路中，以自适应电网强度变化带来的差异化谐振现象。文献[20]提出一种桥臂电压与带通滤波电容电压组合的前馈控制方案以拓展阻尼范围。由于传统电压前馈方案因弱网下正反馈通道与电网阻抗耦合而影响系统改善性能，因此上述方案的参数整定需兼顾系统的鲁棒性和稳定性[18]。而另一控制环路改造思路为电流反馈。文献[21-22]通过在电网电压前馈与输出电流反馈回路中引入带阻滤波器以增大逆变器线路及并网点等效阻尼，避免谐波谐振发生。文献[23]在并网电流经高通滤波器反馈阻尼的基础上，在电压前馈回路中新引入了基于二阶广义积分器的相位重塑单元以抑制弱网谐振。

文献[14-15]深入揭示了新能源并网系统源网交互发生谐振的原因，但对区域性高比例新能源并网系统，以强网弱化后谐波谐振为约束的渗透率特性分析鲜有研究。同时，研究人员基于电压前馈[18-20]及电流反馈[21-23]思路修改逆变器控制环路以增加阻尼，提出了诸多谐波谐振抑制方案。但是附加控制环节关键参数的整定研究不足，具有一定的经验依赖性。

针对高比例新能源并网系统强网弱化易谐振的新特征，为给区域性新能源发电系统规划与调控提供依据，本文研究了整县光伏推进下区域性屋顶光伏系统的渗透率特性及其边界提高方案。基于阻抗模型，分析了新能源并网容量与电网强度之间的关系，并以强网弱化后谐波谐振为约束，探究了差异化调控出力及台数对新能源渗透率的影响。进一步考虑渗透率实现的调控方案经济性，提出了基于双重稳定约束的分布式阻尼极限重构方案，并以系统级阻抗匹配及底层零极点分布为约束，评估了分布式阻尼极限重构能力，以实现逆变器额定出力调控下新能源渗透率的最大提高。

1　屋顶光伏并网系统强网弱化特性分析

本文以安装在低压配电网侧的工业屋顶光伏为对象，研究其区域电网的渗透率特性，其特点如下：1) 工业屋顶光伏多采用组串式逆变器并入低压配电网，呈多逆变器并联组网形式；2) 对于配电网某一节点的区域光伏可等效视为一新能源集群，未来在“双碳”政策指引下将呈高比例特征，同时为适应未来电力系统电源侧和负荷侧的多元化调控需

求，该系统具有集群调控特性。综上，该区域新能源发电系统呈现高比例及多机群控的特征。本文所研究的区域性单母线新能源多机群控并网系统如图 1 所示。其中，各新能源发电单元通过电流控制型 LCL 接口逆变器实现单位功率因数并网。

图 1 中，u、u_c、u_o 分别为逆变桥输出电压、电容电压、端口电压；L_f、C_f、R_d、L_t 分别为机侧滤波电感、滤波电容、阻尼电阻、网侧滤波电感；i_L、i_c、i_o 分别为机侧电感电流、电容电流、逆变器端口电流；i_{oabc}、u_{oabc} 分别为 abc 坐标系下的逆变器端口输出电流和电压；i_{od}、i_{oq}、i_{odref}、i_{oqref}、u_{od}、u_{oq} 分别为逆变器端口输出电流、给定电流、输出电压的 d、q 轴分量；θ 为锁相环输出相角。

1.1 屋顶光伏系统阻抗模型

根据图 1 中源网侧的控制特性，电流控制型逆变器可等效为理想电流源并联输出阻抗的诺顿形式，电网侧可等效为理想电压源串联阻抗的戴维南形式。因此，该多机并网系统等效电路模型如图 2 所示。

图 2 中，$\boldsymbol{i}_{o,1}$、$\boldsymbol{i}_{o,n}$ 分别为第 1 台、第 n 台逆变器

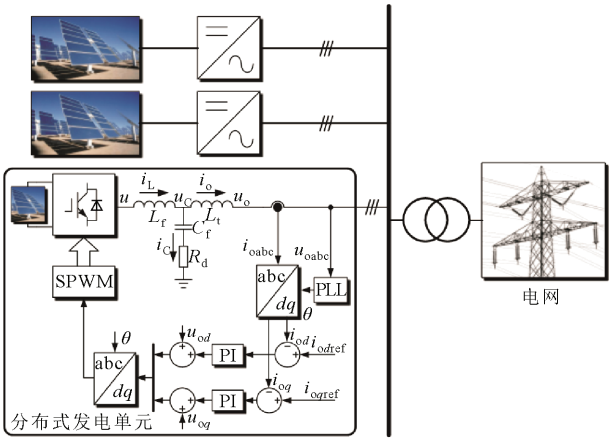


图 1 屋顶光伏系统结构

Fig.1 Structure of the rooftop photovoltaic system

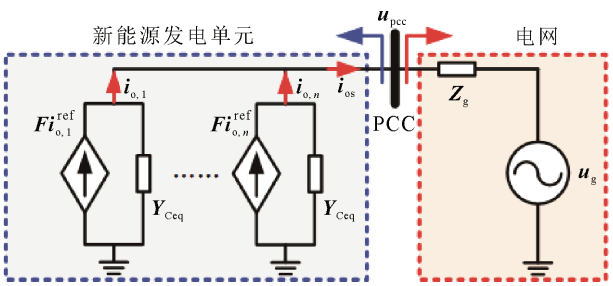


图 2 多逆变器并网系统等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit of grid-connected system with multi-parallel inverters

输出电流矩阵；$\boldsymbol{i}_{os}$ 为逆变器集群输出总电流矩阵；$\boldsymbol{F}$ 为逆变器单电流环的传递函数矩阵；$\boldsymbol{i}_{o,1}^{ref}$、$\boldsymbol{i}_{o,n}^{ref}$ 分别为为第 1 台、第 n 台逆变器给定电流矩阵；$\boldsymbol{Y}_{Ceq}$ 为逆变器等效输出导纳矩阵；$\boldsymbol{Z}_g$ 为网侧阻抗矩阵；$\boldsymbol{u}_{pcc}$ 为并网点电压矩阵；$\boldsymbol{u}_g$ 为电网电压矩阵。

理想电网下，电流控制型单机逆变器输出特性可写为：

$$\boldsymbol{i}_o = \boldsymbol{F}\boldsymbol{i}_o^{ref} - \boldsymbol{Y}_{Ceq}\boldsymbol{u}_{pcc} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{i}_o$ 为逆变器端口输出电流矩阵；$\boldsymbol{i}_o^{ref}$ 为单机逆变器给定电流矩阵。

多机逆变器并非理想电网时，网侧阻抗 $\boldsymbol{Z}_g$ 不可忽略，并网点电压 $\boldsymbol{u}_{pcc}$ 与电网电压 $\boldsymbol{u}_g$ 不相同。且由于各逆变器自身阻抗 $\boldsymbol{Z}_{Ceq}$ 和网侧阻抗 $\boldsymbol{Z}_g$ 的存在，导致图 2 中节点电压 $\boldsymbol{u}_{pcc}$ 及各环路电流之间存在耦合特性，其输出电流特性除受自身电流特性影响外，还受其他逆变器端口输出电流及电网电压的影响。

非理想电网工况下，基于电路原理中的节点电压法，可得到图 2 所示等效电路模型各支路电流方程，见附录 A 式(A1)。基于式(A1)，图 2 中第 i 台逆变器的输出电流表达式可推导为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{i}_{o,i} = &\left(\boldsymbol{I} - \left(\boldsymbol{I} + \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)^{-1}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{i}_{o,i}^{ref} - \\ &\sum_{k=1,k\neq i}^{n}\left(\left(\boldsymbol{I} + \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)^{-1}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)\boldsymbol{F}_k\boldsymbol{i}_{o,k}^{ref} - \\ &\left(\boldsymbol{I} + \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)^{-1}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{u}_g\end{aligned} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{I}$ 为单位阵；带下角标 i、k 的变量分别代表第 i 台、第 k 台逆变器的相关变量；n 为总的逆变器台数。

根据式(2)，屋顶光伏系统中 n 台逆变器并联的输出总电流表达式为：

$$\boldsymbol{i}_{os} = n\boldsymbol{i}_{o,i} = \left(\boldsymbol{I} + \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g\right)^{-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\boldsymbol{F}_i\boldsymbol{i}_{o,i}^{ref} - \boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{u}_g\right) \tag{3}$$

由式(3)可以看出，假设电网和所有逆变器均自身稳定，则屋顶光伏系统的运行特性与电网阻抗及逆变器阻抗密切相关，仅需分析式(4)所示源网阻抗比的匹配情况即可实现系统运行情况的评估。

$$\boldsymbol{L} = \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Y}_{Ceqi}\boldsymbol{Z}_g = \sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{Z}_{Ceqi}^{-1}\boldsymbol{Z}_g \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{L}$ 为源网阻抗回比矩阵；逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{Ceq}$ 和网侧阻抗 $\boldsymbol{Z}_g$ 的表达式分别如式(5)、式(6)所示。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}=(\boldsymbol{G}_{\mathrm{id}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{del}}\left(\boldsymbol{k}_{\mathrm{v}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLv}}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLd}}-\boldsymbol{G}_{\mathrm{ci}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLi}}\right)\boldsymbol{k}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{out}}^{-1})^{-1}\left(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{G}_{\mathrm{id}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{del}}\boldsymbol{G}_{\mathrm{ci}}\boldsymbol{k}\right) \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{G}_{\mathrm{id}}$ 为占空比对输出电流的系数矩阵；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{out}}$ 为主电路阻抗矩阵；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{del}}$ 为由数字控制及脉宽调制引起的延迟环节的传递函数矩阵；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLd}}$、$\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLi}}$、$\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLv}}$ 分别为锁相环环节对占空比、输出电流、输出电压影响的传递函数矩阵；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{ci}}$ 为电流环 PI 控制器传递函数矩阵；$\boldsymbol{k}$ 为采样滤波传递函数矩阵；$\boldsymbol{k}_{\mathrm{v}}$ 为电网电压前馈系数矩阵。各矩阵表达式见附录 A 式(A2)—式(A8)。

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}=\begin{bmatrix} sL_{\mathrm{g}} & -\omega L_{\mathrm{g}} \\ \omega L_{\mathrm{g}} & sL_{\mathrm{g}} \end{bmatrix} \tag{6}$$

式中：L_{g} 为网侧电感；ω 为基波角频率；s 为 Laplace 变换中的复变量。

式(4)中，源网阻抗幅值相等时的频率 f_{c} 为共有谐振点，该频率点相角裕度 k_{PM} 如式(7)所示，即通过判断源网阻抗交叉点处的相角裕度来预判谐振的发生与否。当源网阻抗相角差大于 180° 时，相角裕度 k_{PM} 小于 0，系统将不稳定，反之则稳定。

$$k_{\mathrm{PM}}=180^{\mathrm{o}}-\left(\arg\left(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}\left(f_{\mathrm{c}}\right)\right)-\arg\left(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}\left(f_{\mathrm{c}}\right)\right)\right) \tag{7}$$

1.2　多机并网系统强网弱化特性分析

该并网系统参数如附录 B 表 B1 所示。屋顶光伏系统中，假设每个逆变器的结构及控制参数均相同，即 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq1}}=\cdots=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}n}$。将表 B1 所示参数代入式(5)，以逆变器端口输出电流及并联台数为变量的逆变器阻抗表达式见附录 A 式(A9)—式(A13)，应用 MATLAB Bode 图指令编程，可绘制出随逆变器输出功率(令 n=1，单机逆变器并网电流 I_{od}^{s} 分别取 40、32、24 A)及并联台数(令 I_{od}^{s}=40 A，n 分别取 1、2、3、4)变化时的输出阻抗 Bode 图，如附录 C 图 C1 所示。由图 C1(a)可以看出，随着逆变器输出功率的不断增大，qq 轴阻抗不断减小。由图 C1(b)可以看出，随着逆变器台数的增加，逆变器各轴等效阻抗均不断减小。因此，随着区域性新能源多机群控系统并网容量的不断提高，逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}$ 不断减小。根据式(4)可知，假设逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}$ 不变，则折算到网侧的等效阻抗将不断变大。

对于该并网系统，渗透率表达式为：

$$\delta_{\mathrm{penetration}}=\frac{P_{\mathrm{renewable}}}{P_{\mathrm{renewable}}+P_{\mathrm{grid}}}\times 100\% \tag{8}$$

式中：$\delta_{\mathrm{penetration}}$ 为新能源渗透率；P_{grid} 为电网额定功率；$P_{\mathrm{renewable}}$ 为系统内所有新能源发电功率之和。

考虑渗透率与电网阻抗的耦合影响，将式(8)代入传统短路比表达式中，消去中间变量 $P_{\mathrm{renewable}}$，得到高比例新能源发电系统短路比 k_{SCR} 表达式为：

$$k_{\mathrm{SCR}}=\frac{S_{\mathrm{grid}}}{P_{\mathrm{renewable}}}=\frac{{U_{\mathrm{PCC}}}^2}{P_{\mathrm{renewable}}Z_{\mathrm{g}}}=\frac{\left(1-\delta_{\mathrm{penetration}}\right){U_{\mathrm{PCC}}}^2}{\delta_{\mathrm{penetration}}P_{\mathrm{grid}}Z_{\mathrm{g}}} \tag{9}$$

式中：S_{grid} 为电网短路容量；U_{PCC} 为并网点电压；Z_{g} 为网侧等效阻抗。

根据附录 B 表 B1 所示的参数，将电网相电压幅值 U_{PCC}=311 V 及电网额定容量 P_{grid}=100 kW 代入式(9)，k_{SCR} 的具体表达式见附录 A 式(A14)。令式(A14)中渗透率 $\delta_{\mathrm{penetration}}$ 的变化范围为 10%~90%、网侧电感 L_{g} 的变化范围为 0.5~1 mH，应用 MATLAB 3D 绘图指令可绘制出图 3 所示的电网强度关于渗透率、网侧等效阻抗的关系曲面。

由图 3 可以看出，在任一区域电网内，当其网侧物理等效阻抗固定时，随着新能源渗透率的提高，屋顶光伏系统的电网强度不断变弱，导致源网端易交互、产生谐波谐振，从而制约新能源渗透率水平的进一步提高。

2　屋顶光伏系统渗透率特性分析及提升研究

2.1　屋顶光伏多机群控渗透率

考虑新能源发电单元在群调群控下的实际发电功率及并联单元数量，新能源发电功率可改写为：

$$P_{\mathrm{renewable}}=nP_{\mathrm{out\,max}}=n\alpha P_{\mathrm{inv}} \tag{10}$$

式中：P_{outmax} 为多机群控调度下新能源发电单元允许发出的最大功率，为方便分析，后文 P_{outmax} 采用标幺值形式；α 和 P_{inv} 分别为功率调控系数及单机额定输出功率。

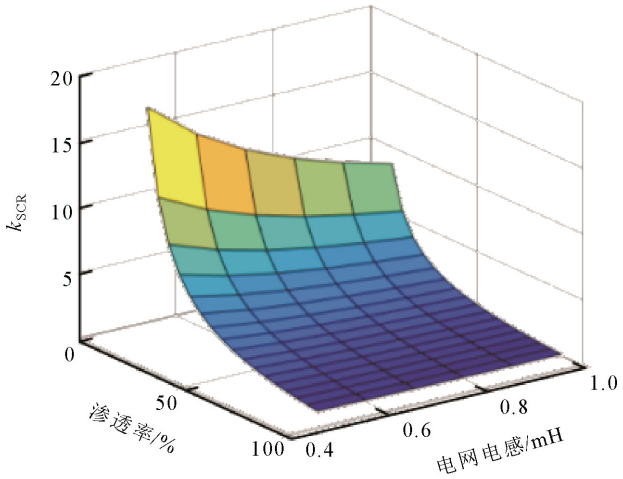


图 3　强网弱化特性曲面

Fig.3　Surface of grid weakening characteristics

将式(10)代入式(8)，渗透率定义改写为：

$$\delta_{\text{penetration}}=\frac{n\alpha P_{\text{inv}}}{n\alpha P_{\text{inv}}+P_{\text{grid}}}\times 100\% \tag{11}$$

由式(11)可知，渗透率受新能源发电单元并联数量 n 与所允许发出最大功率 P_{outmax} 的影响。小规模的大功率发电单元与大规模的小功率发电单元可达到相同的渗透率水平。为评估渗透率达成经济性，基于发电/建设成本的经济性指标 λ_{economy} 可表示为：

$$\lambda_{\text{economy}}=\frac{nP_{\text{out max}}C_{\text{generation}}}{nC_{\text{construction}}}=\frac{n\alpha P_{\text{inv}}C_{\text{generation}}}{nC_{\text{construction}}} \tag{12}$$

式中：$C_{\text{generation}}$ 为每台发电单元的每度电发电收益；$C_{\text{construction}}$ 为区域性新能源发电系统的建设成本。

当新能源发电单元功率调控系数 α=1 时，系统处于额定发电状态；当功率调控系数 0<α<1 时，系统处于功率限发状态。以 α=1 时的渗透率达成经济性指标为基准值，标幺化渗透率达成经济性指标 λ_{pu} 可表示为：

$$\lambda_{\text{pu}}=\frac{\lambda_{\text{economy}}^{\text{limited}}}{\lambda_{\text{economy}}^{\text{rated}}}=\frac{\dfrac{n\alpha P_{\text{inv}}C_{\text{generation}}}{nC_{\text{construction}}}}{\dfrac{nP_{\text{inv}}C_{\text{generation}}}{nC_{\text{construction}}}}=\alpha \tag{13}$$

式中：$\lambda_{\text{economy}}^{\text{limited}}$、$\lambda_{\text{economy}}^{\text{rated}}$ 分别为系统处于功率限发状态和额定发电状态的渗透率达成经济性指标。

由式(13)可以看出，λ_{pu} 与 α 相等，即所有新能源发电单元均处于额定发电功率下，并网系统具有最优经济性。基于以上分析，根据附录 B 表 B1 所示参数，将单机逆变器额定功率 P_{inv}=18.66 kW 及电网额定容量 P_{grid}=100 kW 代入式(11)，其渗透率 $\delta_{\text{penetration}}$ 的表达式见附录 A 式(A15)。令式(A15)中 α 即 P_{outmax} 的标幺值变化范围为 0.1~1、发电单元并联数量的变化范围为 1~8 台，应用 MATLAB 3D 绘图指令，可得新能源渗透率关于发电单元并联数量、发电功率及渗透率达成经济性指标的 4 维调控关系曲面如附录 C 图 C2 所示。由图 C2 可知，渗透率水平会随着新能源发电单元并联数量及新能源发电输出功率的提高而提高。

2.2 基于功率限发调控的多机逆变器渗透率分析

针对 1.2 节分析的屋顶光伏系统强网弱化易谐振的特征，为区域性新能源发电系统提供规划依据，本节以强网弱化后谐波谐振为约束，探究差异化调控出力及调控台数下的新能源渗透率特性。

接下来，基于阻抗分析法，分析不同调控工况下的系统运行特性。将附录 B 表 B1 所示参数代入式(5)、式(6)，以逆变器端口输出电流及并联台数为变量的逆变器阻抗具体表达式见附录 A 式(A9)—式(A13)，网侧阻抗具体表达式见附录 A 式(A16)，应用 MATLAB Bode 图指令编程，可绘制出不同逆变器输出功率(I_{od}^{s} 分别取 40、32、24 A)下并联台数变化时的输出阻抗 Bode 图及网侧阻抗 Bode 图。当逆变器调控功率标幺值 P_{outmax}=1(I_{od}^{s}=40 A)时，不同渗透率下的阻抗 Bode 图如图 4 所示。图 4 中，$Z_{\text{Ceq}dd}$、$Z_{\text{Ceq}dq}$、$Z_{\text{Ceq}qd}$、$Z_{\text{Ceq}qq}$ 分别为逆变器 *dd* 轴、*dq* 轴、*qd* 轴、*qq* 轴等效阻抗；Z_{gdd}、Z_{gdq}、Z_{gqd}、Z_{gqq} 分别为电网 *dd* 轴、*dq* 轴、*qd* 轴、*qq* 轴等效阻抗；各幅值图中，逆变器等效阻抗均有多条曲线，分别对应不同渗透率时的情况(后文类似)。

由图 4 可以看出，随着并网系统渗透率的增加，逆变器等效输出阻抗不断减小。逆变器台数由 3 台增加至 4 台、渗透率由 35.89%提高至 42.74%后，并网逆变器 *qq* 轴等效输出阻抗与 *qq* 轴网侧阻抗的幅值交叉点偏移，交叉点处源网阻抗相角差为 201°，大于 180°，交叉点频率为 351 Hz，表征系统新能源渗透率提高至 42.74%时，系统将发生谐波谐振。

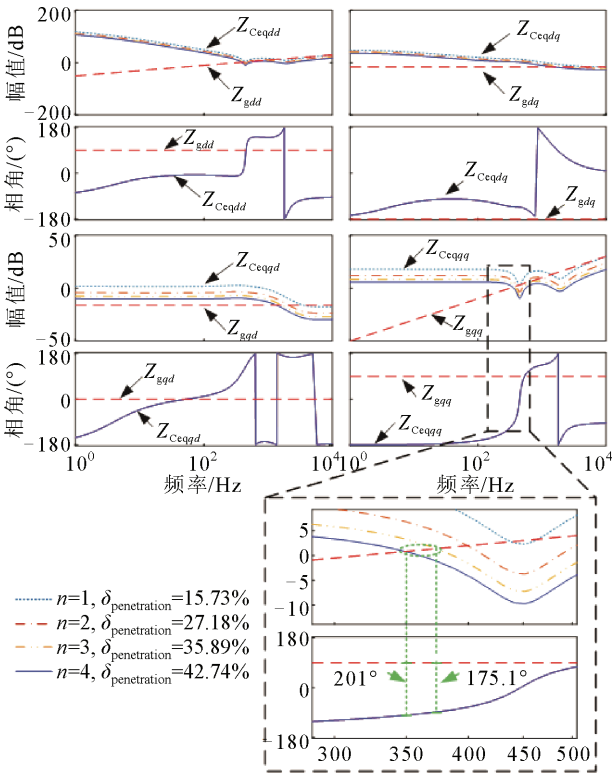


图 4 P_{outmax}=1 时不同渗透率下的阻抗 Bode 图

Fig.4 Bode diagrams of impedances with different penetrations when P_{outmax}=1

当调控功率标幺值 P_{outmax} 分别取 0.8 和 0.6(I^{s}_{od} 取 32 和 24 A)时，该调控工况不同渗透率下阻抗 Bode 图分别如附录 C 图 C3、图 C4 所示。同样基于阻抗理论对图 C3、图 C4 源网端阻抗进行分析：P_{outmax}=0.8 时，最多 4 台逆变器并网可稳定运行；P_{outmax}=0.6 时，最多 7 台逆变器并网可稳定运行。

因此，通过对逆变器功率限发调控，新能源渗透率由最初的 35.89%提高至 43.94%，但其渗透率达成经济性指标 λ_{pu} 逐渐变差，由 1 逐渐降低至 0.6。

2.3　基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案

2.3.1　分布式阻尼重构基本原理

新能源并网逆变器采用传统输出电流控制时，渗透率受谐波谐振约束无法继续提高。对单机逆变器最大发电功率 P_{outmax} 进行限发调控虽然可在一定程度上提高系统的渗透率边界，但是渗透率达成经济性指标会逐渐变差，且逆变器功率限发会导致其工作于非最优状态。因此，为极大提高渗透率水平且避免新能源发电单元限发，在考虑经济成本的前提下，需研究逆变器级额定调控下无需额外检测元件的新型谐振阻尼方法。

由 2.2 节分析可知，逆变器等效输出阻抗随着新能源渗透率的增加不断变小，随之源网阻抗匹配失谐发生谐振。为抑制强网弱化产生的谐波谐振，增强逆变器 P_{outmax}=1 时的自身调控能力，本文提出一种可根据逆变器规模自由拓展的分布式阻尼重构方案。逆变器级等效阻尼小信号框图如图 5 所示。

图 5 中，$\boldsymbol{Z}_{\text{Lf}}$、$\boldsymbol{Z}_{\text{Cf}}$、$\boldsymbol{Z}_{\text{Lt}}$ 分别为 LCL 滤波器逆变器侧电感、滤波电容、网侧电感传递函数矩阵；$\boldsymbol{G}_{\text{pwm}}$ 为逆变电路增益传递函数矩阵；$\boldsymbol{Z}_{\text{damp}}$ 为阻尼矩阵；$\boldsymbol{G}_{\text{EQU}}$ 为节点前移等效变换矩阵；$\Delta i^{c}_{\text{oref}}$、$\Delta i^{c}_{o}$、$\Delta d^{c}$ 分别为控制坐标系电流参考信号、反馈电流、占空比扰动量；Δi^{s}_{o}、Δu^{s}_{o}、Δd^{s} 分别为系统坐标系下逆变器端口输出电流、输出电压、占空比扰动量。

基于经典控制框图节点前移等效变换理论，通过将图 5 虚线所示真实阻尼环节 $\boldsymbol{Z}_{\text{damp}}$ 反馈节点前移，可获得具有物理含义等价的软件控制环路如粗实线所示，即输出电流通过节点前移等效变换阵 $\boldsymbol{G}_{\text{EQU}}$ 形成阻尼控制量叠加至底层逆变器调制波中，从而实现阻尼重构。根据以上实现方式，该方案具有以下 2 个特点：

1）控制环路：与传统输出电流经比例环节直接引入给定反馈端的形式相比，该阻尼环路的串联环节具有等价物理含义且引入节点不经过电流环控制器等控制环节，减少了电流环控制器动态响应对阻尼重构的影响。

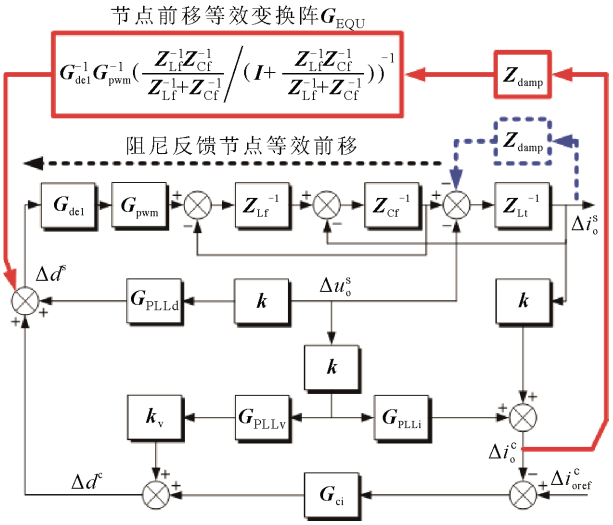


图 5　分布式阻尼重构方案

Fig.5　Distributed damping reconstruction control scheme

2）实现形式：以分布式形式增加逆变器级的阻尼，等效提高了系统的整体阻尼程度。所提方案无需额外检测元件且可根据逆变器规模自由拓展，相比于集中式阻尼装置，节约了安装成本并避免了集中式阻尼装置容量随新能源并网规模的再规划。

由图 5 可推导出采用分布式阻尼重构方案后的逆变器阻抗为：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Z}_{\text{Ceq_revised}} = &(\boldsymbol{G}_{\text{id}}\boldsymbol{G}_{\text{del}}(\boldsymbol{k}_{\text{v}}\boldsymbol{G}_{\text{PLLv}}+\boldsymbol{G}_{\text{PLLd}}-(\boldsymbol{G}_{\text{ci}}+\\ &\boldsymbol{Z}_{\text{damp}}\boldsymbol{G}_{\text{EQU}})\boldsymbol{G}_{\text{PLLi}})\boldsymbol{k}+\boldsymbol{Z}_{\text{out}}^{-1})^{-1}(\boldsymbol{I}+\\ &\boldsymbol{G}_{\text{id}}\boldsymbol{G}_{\text{del}}(\boldsymbol{G}_{\text{ci}}+\boldsymbol{Z}_{\text{damp}}\boldsymbol{G}_{\text{EQU}})\boldsymbol{k})\end{aligned} \tag{14}$$

节点前移等效变换阵 $\boldsymbol{G}_{\text{EQU}}$ 与阻尼矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\text{damp}}$ 的表达式分别为：

$$\boldsymbol{G}_{\text{EQU}} = \boldsymbol{G}_{\text{del}}^{-1}\boldsymbol{G}_{\text{pwm}}^{-1}\left(\frac{\boldsymbol{Z}_{\text{Lf}}^{-1}\boldsymbol{Z}_{\text{Cf}}^{-1}}{\boldsymbol{Z}_{\text{Lf}}^{-1}+\boldsymbol{Z}_{\text{Cf}}^{-1}}\Big/\left(\boldsymbol{I}+\frac{\boldsymbol{Z}_{\text{Lf}}^{-1}\boldsymbol{Z}_{\text{Cf}}^{-1}}{\boldsymbol{Z}_{\text{Lf}}^{-1}+\boldsymbol{Z}_{\text{Cf}}^{-1}}\right)\right)^{-1} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{Z}_{\text{damp}} = \begin{bmatrix} k_{\text{damp}} & 0 \\ 0 & k_{\text{damp}} \end{bmatrix} \tag{16}$$

式中：k_{damp} 为附加阻尼环路参数。

2.3.2　基于双重稳定约束的阻尼重构极限评估

由图 5 可以看出，$\boldsymbol{G}_{\text{EQU}}$ 直接由节点前移等效变换而来，仅与逆变器电气参数、增益相关，因此，附加阻尼环路参数 k_{damp} 的取值会直接影响分布式阻尼的重构能力。过小的 k_{damp} 会导致逆变器级重构阻尼不足，从而难以抑制高渗透率下的谐振问题；而理论上，不断增加 k_{damp} 可使逆变器侧阻尼呈无穷大，系统谐振将被完全抑制，渗透率边界将被极大

提高，甚至接近 100%。但是，过大的 k_{damp} 会导致叠加到调制波中的阻尼等效控制量过补偿，进而导致逆变器自身失稳。因此，综合上述系统级谐振抑制及逆变器级单机运行约束，提出基于屋顶光伏系统整体谐振抑制及底层稳定约束的阻尼参数评估方案，以确定阻尼重构极限，探究采用改进方案后渗透率边界的最大提升能力。

首先，利用源网等效阻抗 Bode 图评估基于系统级谐振抑制约束的 k_{damp} 下限。由 2.2 节分析可知，逆变器调控输出功率标幺值 P_{outmax}=1，渗透率增加至 42.74%时，并网系统存在谐波谐振，渗透率提高受限。将附录 B 表 B1 所示参数代入式(6)、式(14)所示的源网侧输出阻抗通用模型，可获得附录 A 式(A16)所示的网侧阻抗具体表达式及附录 A 式(A17)—式(A21)所示的采用改进控制方案的逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{Ceq_revised}$ 具体表达式。相同工况下，采用分布式阻尼重构方案，不同 k_{damp} 时源网的等效阻抗 Bode 图如图 6 所示，其中，$Z_{Ceqdd_revised}$、$Z_{Ceqdq_revised}$、$Z_{Ceqqd_revised}$、$Z_{Ceqqq_revised}$ 分别为采用改进控制方案的逆变器 *dd* 轴、*dq* 轴、*qd* 轴、*qq* 轴等效阻抗。当 k_{damp}=0.01 时，逆变器 *qq* 轴阻抗幅值虽有提升，但源网阻抗幅值交叉点相角差由图 4 中的 201°减小至 198°，仍大于 180°。当 k_{damp} 提高至 0.09 时，源网阻抗幅值交叉点相角差等于 180°，采用改善方案后系统临界稳定，为 k_{damp} 下限临界值。

由图 6 可以看出：随着 k_{damp} 的不断增加，逆变器 *qq* 轴等效输出阻抗幅值在 100 Hz 以上的中高频段不断提高，源网阻抗幅值交叉点相角差不断地减小；当 k_{damp}=1 时，*qq* 轴源网阻抗幅值交叉点相角差仅为 23°，远小于 180°；当 k_{damp} 提高至一定程度后，如当 k_{damp}=4 时，原本源网阻抗幅值交叉点消失，即潜在谐振点消失。

考虑附加阻尼回路控制量过补偿而导致逆变器自身失稳的风险，接下来，求解逆变器自身闭环传递函数，通过其零极点评估基于底层逆变器稳定约束的 k_{damp} 上限。根据图 5，推导改进控制方案下逆变器闭环传递函数 F_r 为：

$$F_r=\frac{k_{pwm}e^{-1.5T_s}(sk_p+k_i)(R_d+1)}{s(sL_f+R_f)(sL_t+R_t)}\left(1+\frac{R_d+1}{sL_f+R_f}+\frac{R_d+1}{sL_t+R_t}+\frac{k_{damp}(sk_p+k_i)(R_d+1)(L_fC_fs^2+sC_f(R_d+R_f)+1)}{s(sL_f+R_f)(sL_t+R_t)(sC_fR_d+1)}\right)^{-1} \tag{17}$$

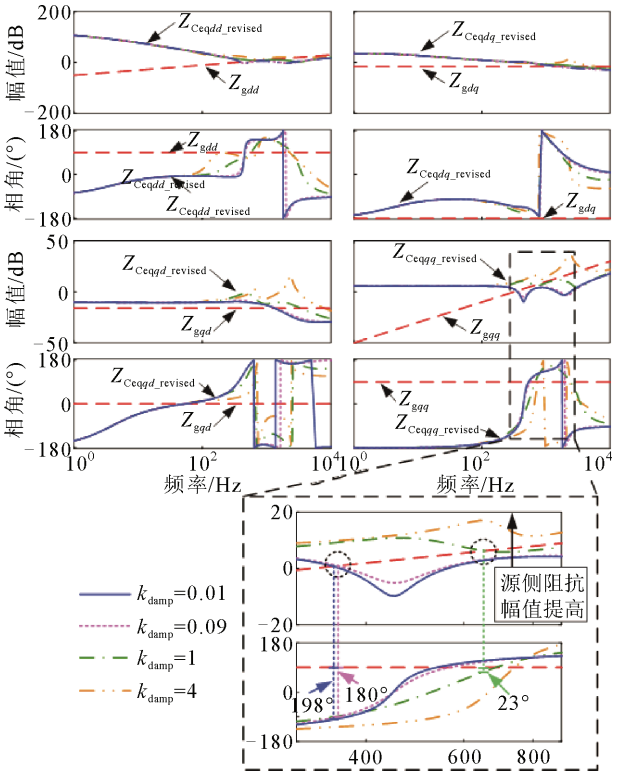


图 6 不同 k_{damp} 下采用阻尼重构控制的阻抗 Bode 图

Fig.6 Bode diagrams of impedances by applying the damping reconstruction control with different k_{damp} values

式中：k_{pwm} 为逆变器增益；k_p、k_i 分别为电流环比例、积分参数；T_s 为开关周期；R_f、R_t 分别为逆变器侧滤波电感的寄生电阻和网侧滤波电感的寄生电阻。

根据附录 B 表 B1 所示参数，将 PI 控制器参数、逆变器主电路参数代入式(17)，其闭环传递函数具体表达式见附录 A 式(A22)。令式(A22)中 k_{damp} 的取值范围为 0.1~8，应用 MATLAB 中 pzmap 求取零极点指令，可绘制出 k_{damp} 从 0.1 变化到 8 时，F_r 的零极点分布变化趋势图，如图 7 所示。随着 k_{damp} 的增大，闭环极点逐渐向右半平面移动，当 k_{damp} 达到临界值($k_{damp_critical}$=5.2)时，逆变器自身处于临界稳定。受逆变器底层稳定约束，k_{damp} 存在上限约束。

通过双重稳定约束对阻尼参数上下限进行评估，可获得阻尼参数 k_{damp} 的可行范围为[0.09，5.2]，根据该参数整定范围可评估阻尼极限重构参数。故在全局谐振抑制最优及逆变器底层稳定的前提下，为保证逆变器在额定出力下具有最强的谐振阻尼能力，以实现渗透率的最大提高，k_{damp} 取 5。

2.4 基于分布式阻尼重构方案的渗透率特性分析

应用 MATLAB Bode 图指令，可绘制逆变器采用基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案，

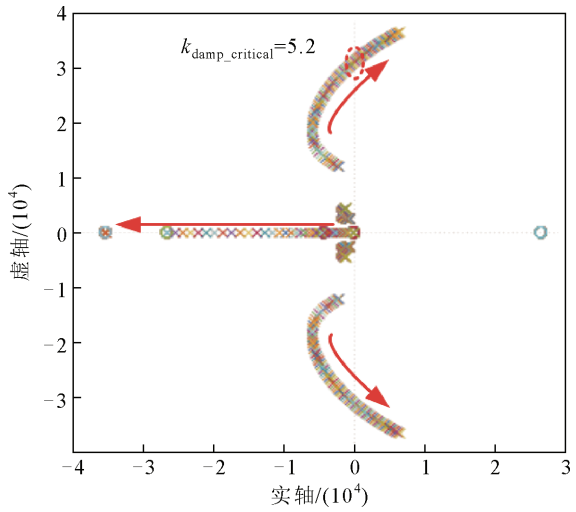


图 7　不同 k_{damp} 下 F_r 的零极点分布图

Fig.7　Pole-zero locations of F_r with different k_{damp} values

k_{damp}=5、调控功率标幺值 P_{outmax}=1 时的阻抗 Bode 图如图 8 所示。采用改进控制方案后，并联台数增加至 6 台、渗透率为 52.82%时，qq 轴源网阻抗幅值无交叉点，即无潜在谐振点，系统可稳定运行。随着渗透率水平的提高，基于改进控制的逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{Ceq_revised}$ 的幅值不断减小，当渗透率增加至 56.64%时，qq 轴源网等效阻抗幅值相交点处的相角差为 257°，超过 180°，表征采用改进控制方案后系统将再次出现谐波谐振现象。

综合 2.1—2.4 节的分析，该并网系统渗透率边界特性如图 9 所示。各工况下，调控指标对比总结如附录 B 表 B2 所示。由于强网弱化后谐波谐振的制约，如图 1 所示的屋顶光伏多机群控系统最初的渗透率边界为 35.89%，通过对逆变器功率限发调控，新能源渗透率水平逐渐增加至 43.94%。但是随着功率限发，渗透率达成经济性指标 λ_{pu} 由 1 逐渐降低至 0.6。为了极大提高新能源利用率且避免新能源发电单元限发，应用本文提出的基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案，在逆变器额定出力调控且无需额外增加硬件采样的前提下，通过阻尼极限重构参数选取，将渗透率边界由最初的 35.89%最大提升至 52.82%，渗透率水平提高了约 47%。

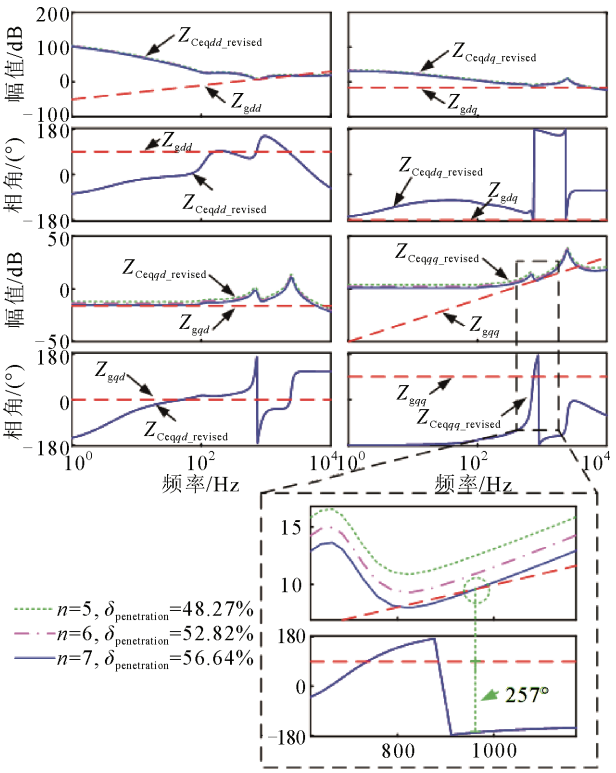


图 8　不同渗透率下采用阻尼重构控制的阻抗 Bode 图

Fig.8　Bode diagrams of impedances by applying the damping reconstruction control with different penetrations

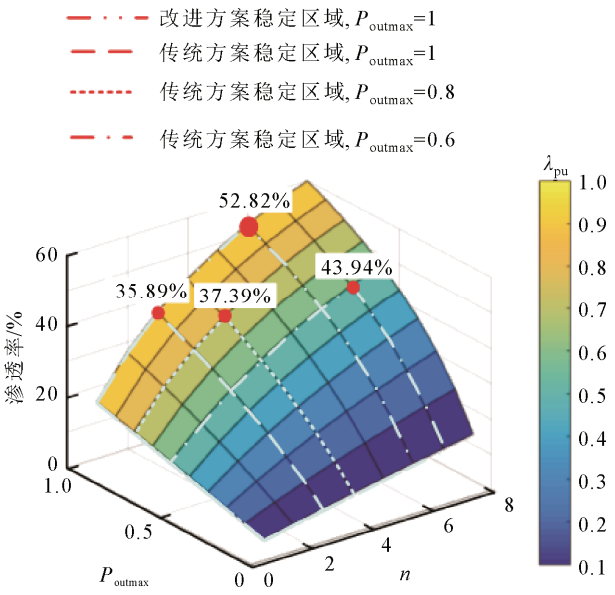


图 9　谐振约束的渗透率边界特性

Fig.9　Characteristics of the penetration boundary with the limitation of harmonic resonance

3　案例分析

为了验证上述分析的正确性，在 MATLAB 软件中搭建了如图 1 所示的区域性新能源并网系统仿真模型。仿真参数如附录 B 表 B1 所示，各逆变器在相同的参数下输出波形均相同，故下文仿真结果只给出单台逆变器的输出波形。

1）工况 1：采用单电流环型逆变器并网。当逆变器调控功率标幺值 P_{outmax}=1 时，3 台、4 台逆变

器并网仿真波形如图 10 所示。并网逆变器台数为 3 台且渗透率为 35.89%时，系统可稳定运行，每台逆变器端口输出电流紧紧跟随单位给定电流 40 A，且正弦度良好。并网逆变器台数增加至 4 台后，渗透率提高至 42.74%时，各逆变器端口输出电流出现了畸变，产生了谐波谐振，仿真结果与 2.2 节的分析相同。该工况下，采用常规控制时，新能源渗透率边界为 35.89%，逆变器最大并网数量为 3 台。

为提高新能源临界渗透率，可对逆变器输出功率进行调控限发，当逆变器调控功率标幺值 P_{outmax}=0.8 时，并网仿真波形如附录 C 图 C5 所示。当并网逆变器台数为 4 台、渗透率为 37.39%时，系统可稳定运行。继续调控逆变器输出功率标幺值，降低至 P_{outmax}=0.6，并网仿真波形如附录 C 图 C6 所示，当渗透率为 43.94%、并网逆变器台数为 7 台时，系统可稳定运行。通过将并网逆变器最大输出功率由 1 限制至 0.6，新能源渗透率逐渐由 35.89%提高至 43.94%。但是伴随着新能源功率限发，其渗透率达成经济性指标 λ_{pu} 不断变差，由 1 下降至 0.6。

2）工况 2：采用基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案。当逆变器调控功率标幺值 P_{outmax}=1 时，逆变器并网仿真波形如图 11 所示。采用常规控制方案时，由图 10(b)可以看出，当并网逆变器台数为 4 台、渗透率为 42.74%时，系统不能稳定运行。相同工况下，采用分布式阻尼重构方案后，逆变器并网台数由 4 台增加至 6 台，即渗透率由 42.74%提高至 52.82%，系统均可稳定运行，如图 11(a)—图 11(c)所示。继续提高新能源渗透率至 56.64%，即 7 台逆变器并网时，逆变器并网电流再次出现了谐波谐振现象，如图 11(d)所示。

上述仿真结果验证了 2.2—2.4 节的理论分析，采用基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案，在逆变器额定出力调控且无需额外增加硬件采样的前提下，新能源渗透率由最初的 35.89%最大提升至 52.82%，且 λ_{pu}=1，即具有最优的渗透率达成经济性指标。

4 实验验证

为了进一步验证上述理论分析和所提方案的有效性，根据图 1 所示原理示意图，搭建了由 6 台逆变器组成的小功率实验验证平台，由于并网调压器最大电流的限制，该并网节点额定功率为 800 W。三相逆变器采用 LCL 输出滤波形式，由数字处理器

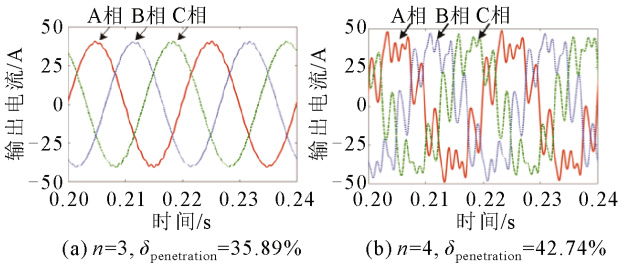


图 10 P_{outmax}=1 时常规控制下逆变器端口电流波形

Fig.10 Output current waveforms of the inverter based on conventional control when P_{outmax}=1

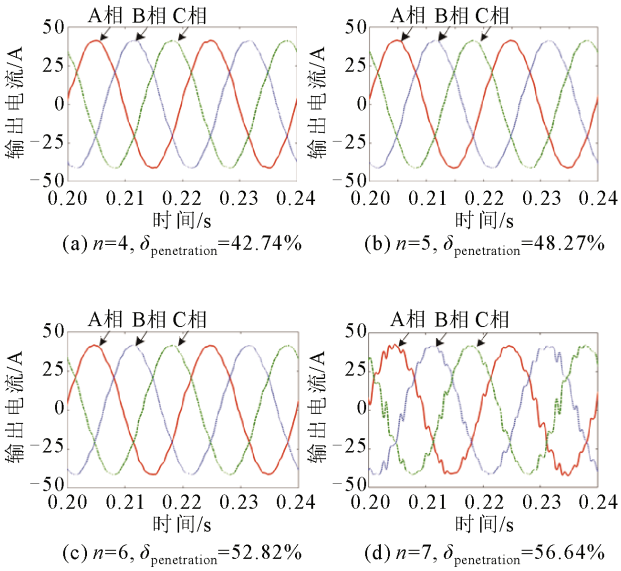


图 11 P_{outmax}=1 时阻尼重构控制下逆变器端口电流波形

Fig.11 Output current waveforms of the inverter based on damping reconstruction control when P_{outmax}=1

TMS320F28335-DSP 实现控制，直流端接可编程电源来模拟分布式单元，输出端经电抗器连接至大电网，实验平台参数如附录 B 表 B3 所示。

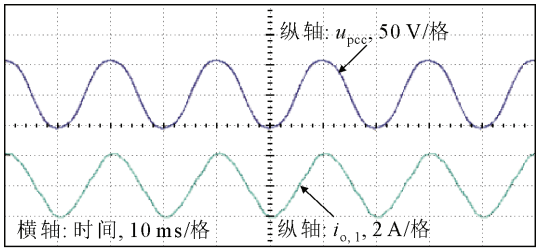
1）工况 1：并网逆变器采用单电流环进行并网实验，P_{outmax}=1 时，不同渗透率下各逆变器端口输出电流 $i_{o,i}$ (i=1, 2, …, n)和电网电压 u_{pcc} 的波形如图 12 所示。由图 12(a)—图 12(c)的实验波形可以看出，1~3 台逆变器并网时，其输出电流与电网电压保持较好的正弦度，可保持稳定运行。继续增加并网逆变器的台数至 4 台，如图 12(d)所示，输出电流与电网电压波形出现谐波谐振。受谐振发生约束，该实验工况下，渗透率 $\delta_{penetration}$=35.89%。

对采用单电流环的逆变器进行功率限发。P_{outmax}=0.8 时，不同渗透率下各 $i_{o,i}$ 和 u_{pcc} 波形如附录 C 图 C7 所示。该工况下，1~4 台逆变器均可稳定运行，图 C7(a)为 4 台逆变器并网稳定运行时的

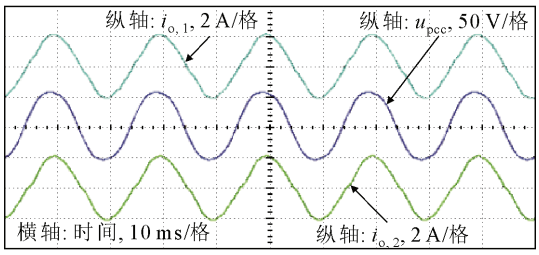
实验波形。当并网逆变器台数增加至 5 台时，如图 C7(b)所示的输出电流与电网电压波形出现谐波谐振。该实验工况下，渗透率提高至 37.39%，但渗透率达成经济性指标 λ_{pu} 由 1 降低至 0.8。

2）工况 2：并网逆变器采用基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案进行并网实验，P_{outmax}=1 时，不同渗透率下各逆变器端口输出电流和电网电压波形如图 13 所示。采用传统控制方案时，由图 12(d)可以看出，4 台逆变器并网不能稳定运行。在相同工况下，采用改进控制方案后，当逆变器台数增加至 4 台时，如图 13(a)所示，各逆变器端口输出电流与电网电压具有较好的正弦度，系统可稳定运行。继续增加逆变器并网台数至 6 台，由图 13(b)可以看出，该实验工况下，并网逆变器可按照实验平台既定最大台数 6 台且在额定出力下并网稳定运行，渗透率提高至 52.82%。

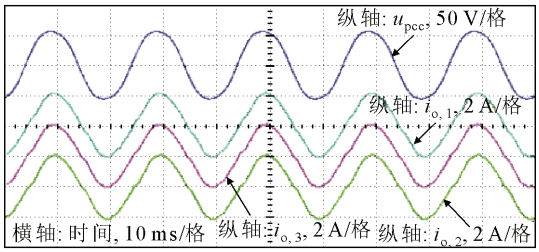
以上实验结果表明，新能源并网系统输出电流与并网点电压随着并网容量的提高将出现谐波谐振，制约着渗透率水平的提高。通过对逆变器进行功率限发调控，可在一定程度上提高采用单电流环



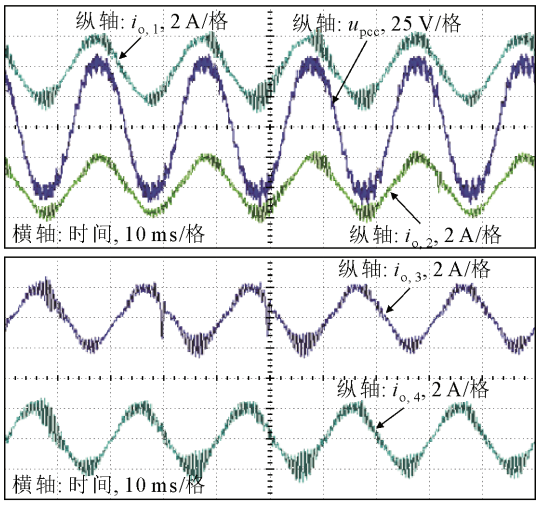
(a) P_{outmax}=1, n=1



(b) P_{outmax}=1, n=2



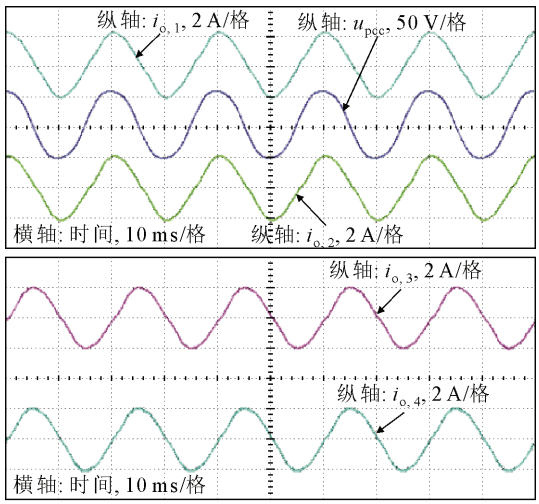
(c) P_{outmax}=1, n=3



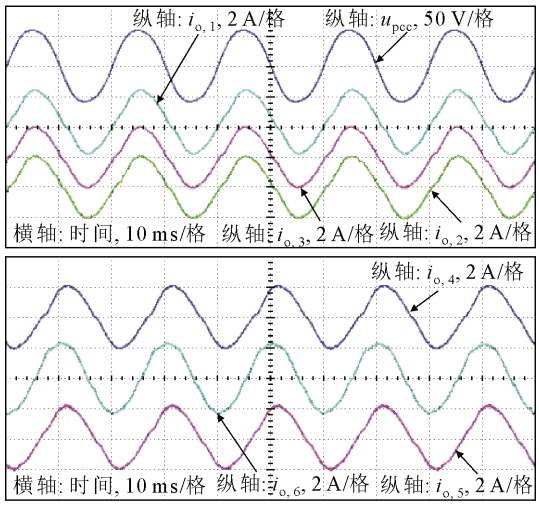
(d) P_{outmax}=1, n=4

图 12　P_{outmax}=1 时单电流环实验波形

Fig.12　Experiment waveforms based on single current control loop when P_{outmax}=1



(a) P_{outmax}=1, n=4



(b) P_{outmax}=1, n=6

图 13　P_{outmax}=1 时阻尼重构控制实验波形

Fig.13　Experiment waveforms based on damping reconstruction control when P_{outmax}=1

方式时的渗透率，但其渗透率达成经济性指标会降低。采用改进控制方案后，在逆变器额定出力调控且无需额外增加硬件的前提下，渗透率由最初的35.89%最大提高至 52.82%。上述实验结果验证了2.2—2.4 节的研究，对提高区域性电网新能源渗透率具有积极意义。

5 结论

1）基于阻抗模型分析，并网逆变器输出功率及并联台数的增加均会导致网侧折算后的等效阻抗变大，揭示了渗透率提高会导致屋顶光伏系统强网弱化的耦合关系及谐振易发机理。

2）以高比例屋顶光伏系统强网弱化后的谐波谐振为制约，分析了多机群控差异化调控出力及台数下的最大渗透率水平，即通过对新能源发电单元输出功率调控限发可一定程度提高新能源渗透率。

3）提出基于双重稳定约束的分布式阻尼重构方案，通过将物理含义等价的阻尼控制量叠加至逆变器调制波中实现阻尼重构，基于谐振抑制及底层稳定的约束评估了阻尼重构极限，在额定出力且无需额外采样的前提下实现了渗透率最大最优提高。

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

参考文献 References

[1] 李庆民，于万水，赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO_2 emissions and carbon neutrality” policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.

[2] 张 稳，盛万兴，刘科研，等. 高渗透率分布式电源按节点关键性接入配电网的运行风险评估[J]. 高电压技术，2021，47(3)：937-945.
ZHANG Wen, SHENG Wanxing, LIU Keyan, et al. Operation risk assessment of high penetration distributed generation connected to distribution network according to node criticality[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 937-945.

[3] MA K, WANG J S, CAI X, et al. AC grid emulations for advanced testing of grid-connected converters—an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 1626-1645.

[4] IEC. Grid integration of renewable energy generation-terms, definitions and symbols: IEC 62934—2021[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2021.

[5] 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.

[6] 马宁宁，谢小荣，贺静波，等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(15)：4719-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4719-4731.

[7] 姜齐荣，王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(22)：7185-7200.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200.

[8] 刘 芳，刘 威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[9] 易 俊，林伟芳，余芳芳，等. 受静态电压稳定约束的新能源临界渗透率计算方法[J]. 电网技术，2020，44(8)：2906-2912.
YI Jun, LIN Weifang, YU Fangfang, et al. Calculation method of critical penetration of renewable energy constrained by static voltage stability[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2906-2912.

[10] 张剑云，李明节. 新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J]. 中国电机工程学报，2020，40(11)：3498-3506.
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3506.

[11] 吴 恒，阮新波，杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报，2014，34(30)：5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.

[12] 杨 苓，陈燕东，周乐明，等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(13)：3792-3804.
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804.

[13] WANG X F, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.

[14] SANG S, GAO N, CAI X. A novel power-voltage control strategy for the grid-tied inverter to raise the rated power injection level in a weak grid[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 219-232.

[15] 许德志，汪 飞，毛华龙，等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报，2013，33(12)：64-71.
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.

[16] WANG X F, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.

[17] JIA L, RUAN X B, ZHAO W X, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9561-9574.

[18] 曹子恒，肖先勇，李 媛，等. 弱电网下 LCL 型并网逆变器的自适应改进前馈控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1567-1576.
CAO Ziheng, XIAO Xianyong, LI Yuan, et al. Adaptive novel

feed-forward control strategy for LCL type grid-connected inverters in the weak grid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1567-1576.

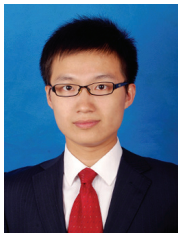
[19] XU J M, XIE S J, QIAN Q, et al. Adaptive feedforward algorithm without grid impedance estimation for inverters to suppress grid current instabilities and harmonics due to grid impedance and grid voltage distortion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7574-7586.

[20] FAIZ M T, KHAN M M, XU J M, et al. Capacitor voltage damping based on parallel feedforward compensation method for *LCL*-filter grid-connected inverter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 837-849.

[21] 杨　苓，陈燕东，罗　安，等. 多机并联接入弱电网的改进型带阻滤波器高频振荡的抑制[J]. 电工技术学报，2019，34(10)：2079-2091.
YANG Ling, CHEN Yandong, LUO An, et al. Suppression method of high-frequency oscillation by improved notch filter for multi-parallel inverters connected to weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2079-2091.

[22] 杨　苓，陈燕东，罗　安，等. 多机并网系统的两带阻滤波器高频振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(8)：2242-2252.
YANG Ling, CHEN Yandong, LUO An, et al. High-frequency oscillation suppression method by two notch filters for multi-inverter grid-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2242-2252.

[23] XU J M, XIE S J, ZHANG B F, et al. Robust grid current control with impedance-phase shaping for LCL-filtered inverters in weak and distorted grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10240-10250.



齐　磊
1990—，男，硕士，讲师
主要从事分布式发电系统稳定性分析及优化控制方面的研究工作
E-mail: qil@ysu.edu.cn

QI Lei



孙孝峰(通信作者)
1970—，男，博士，教授，博导
主要从事新能源变换与组网技术方面的研究工作
E-mail: sxf@ysu.edu.cn

SUN Xiaofeng
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2022-09-20　修回日期　2023-11-20　　编辑　张　准

附录 A

1. 图 2 所示等效电路模型各支路电流方程

$$\begin{cases} \boldsymbol{i}_{\mathrm{o}}=\boldsymbol{Y}_{\mathrm{g}}\left(\boldsymbol{u}_{\mathrm{pcc}}-\boldsymbol{u}_{\mathrm{g}}\right) \\ \boldsymbol{i}_{\mathrm{o},1}=\boldsymbol{F}_1\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},1}^{\mathrm{ref}}-\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Ceq1}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{pcc}} \\ \vdots \\ \boldsymbol{i}_{\mathrm{o},n}=\boldsymbol{F}_n\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},n}^{\mathrm{ref}}-\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Ceq}n}\boldsymbol{u}_{\mathrm{pcc}} \\ \boldsymbol{i}_{\mathrm{o}}=\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},1}+\cdots+\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},n} \end{cases} \tag{A1}$$

式中：$\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},n}$ 为第 n 台逆变器端口输出电流矩阵；$\boldsymbol{F}_n$ 为第 n 台逆变器单电流环的传递函数矩阵；$\boldsymbol{i}_{\mathrm{o},n}^{\mathrm{ref}}$ 为第 n 台单机逆变器给定电流矩阵；$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{Ceq}n}$ 为第 n 台逆变器等效输出导纳矩阵；$\boldsymbol{Y}_{\mathrm{g}}$ 为网侧等效导纳矩阵。

2. 逆变器阻抗模型推导思路及各矩阵含义

为了分析区域性电网中多机逆变器并联运行特性，将逆变器 dq 坐标系下稳态方程施加小信号扰动线性化，建立其输出阻抗小信号模型，其小信号模型如图 A1 所示。图 A1 中，$\Delta i_{\mathrm{oref}}^{\mathrm{c}}$、$\Delta i_{\mathrm{o}}^{\mathrm{c}}$、$\Delta d^{\mathrm{c}}$ 分别为控制坐标系电流参考信号、反馈电流、占空比扰动量，$\Delta i_{\mathrm{o}}^{\mathrm{s}}$、$\Delta u_{\mathrm{o}}^{\mathrm{s}}$、$\Delta d^{\mathrm{s}}$ 分别为系统坐标系下逆变器端口输出电流、输出电压、占空比扰动量。

由图 A1 可推导出 $\Delta u_{\mathrm{o}}^{\mathrm{s}}$ 与 $\Delta i_{\mathrm{o}}^{\mathrm{s}}$ 之间的关系，即输出阻抗 Z_{Ceq}，如正文式(5)所示。式(5)中，各传递函数矩阵表达式分别如下所述。

LCL 滤波器逆变器侧电感、滤波电容、网侧电感传递函数矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Cf}}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}$ 如式(A2)所示。

$$\begin{cases} \boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}=\begin{bmatrix} sL_{\mathrm{f}}+R_{\mathrm{f}} & -\omega L_{\mathrm{f}} \\ \omega L_{\mathrm{f}} & sL_{\mathrm{f}}+R_{\mathrm{f}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{Cf}}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_{\mathrm{f}}}+R_{\mathrm{d}}} & -\omega C_{\mathrm{f}} \\ \omega C_{\mathrm{f}} & \dfrac{1}{\dfrac{1}{sC_{\mathrm{f}}}+R_{\mathrm{d}}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}=\begin{bmatrix} sL_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{t}} & -\omega L_{\mathrm{t}} \\ \omega L_{\mathrm{t}} & sL_{\mathrm{t}}+R_{\mathrm{t}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{A2}$$

式中：L_{f}、L_{t}、C_{f}、R_{d} 分别为逆变器侧滤波电感、网侧滤波电感、滤波电容、滤波器阻尼电阻；ω 为基波角频率。

由数字控制及脉宽调制等效的延迟环节的传递函数矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{del}}$ 为：

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{del}}=\begin{bmatrix} \dfrac{1-0.5T_{\mathrm{del}}s}{1+0.5T_{\mathrm{del}}s} & 0 \\ 0 & \dfrac{1-0.5T_{\mathrm{del}}s}{1+0.5T_{\mathrm{del}}s} \end{bmatrix} \tag{A3}$$

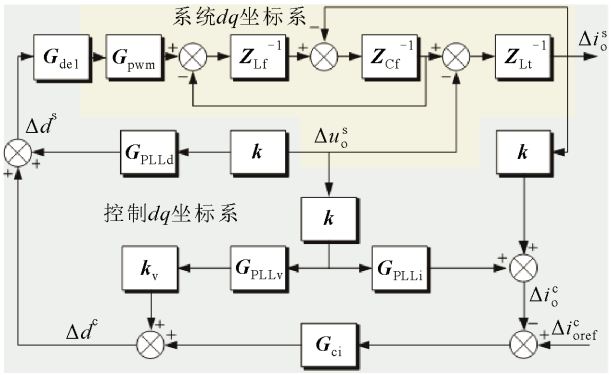


图 A1　屋顶光伏逆变器系统小信号框图

Fig.A1　Small signal scheme of photovoltaic roof's inverter

式中：T_{del} 为由数字控制及脉宽调制等效的延迟时间。

锁相环环节对占空比、输出电流、输出电压影响的传递函数矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLd}}$、$\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLi}}$、$\boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLv}}$ 分别为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLd}}=\begin{bmatrix} 0 & -D_q^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \\ 0 & D_d^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLi}}=\begin{bmatrix} 0 & I_{oq}^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \\ 0 & -I_{od}^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{PLLv}}=\begin{bmatrix} 1 & V_{oq}^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \\ 0 & 1-V_{od}^{\mathrm{s}}T_{\mathrm{PLL}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{A4}$$

式中：D_d^{s}、D_q^{s}、I_{od}^{s}、I_{oq}^{s}、V_{od}^{s}、V_{oq}^{s} 分别为 d、q 轴占空比、输出电流、输出电压稳态量；$k_{\mathrm{p_pll}}$、$k_{\mathrm{i_pll}}$ 分别为锁相环 PI 调节器比例系数和积分系数；

$T_{\mathrm{PLL}}=\dfrac{k_{\mathrm{p_pll}}+\dfrac{k_{\mathrm{i_pll}}}{s}}{V_{od}^{\mathrm{s}}\left(k_{\mathrm{p_pll}}+\dfrac{k_{\mathrm{i_pll}}}{s}\right)+s}$。

电流环 PI 控制器传递函数矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{ci}}$ 为：

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{ci}}=\begin{bmatrix} k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s} & 0 \\ 0 & k_{\mathrm{p}}+\dfrac{k_{\mathrm{i}}}{s} \end{bmatrix} \tag{A5}$$

式中：k_{p}、k_{i} 分别为电流环 PI 调节器比例系数和积分系数。

逆变电路增益传递函数矩阵 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{pwm}}$ 为：

$$\boldsymbol{G}_{\mathrm{pwm}}=\begin{bmatrix} U_{\mathrm{DC}}/2 & 0 \\ 0 & U_{\mathrm{DC}}/2 \end{bmatrix} \tag{A6}$$

式中：U_{DC} 为直流母线电压。

采样滤波传递函数矩阵 $\boldsymbol{k}$ 为：

$$\boldsymbol{k}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{(1+T_{\mathrm{A}}s)(1+T_{\mathrm{B}}s)} & 0 \\ 0 & \dfrac{1}{(1+T_{\mathrm{A}}s)(1+T_{\mathrm{B}}s)} \end{bmatrix} \tag{A7}$$

式中：T_{A}、T_{B} 分别为采样滤波时间。

式(5)中 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{id}}$、$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{out}}^{-1}$ 具体表达式为：

$$\begin{cases} \boldsymbol{G}_{\mathrm{id}}=\left(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Cf}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}\right)^{-1}\dfrac{U_{\mathrm{DC}}}{2} \\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{out}}^{-1}=-\left(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Cf}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lt}}\right)^{-1}\left(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lf}}\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Cf}}\right) \end{cases} \tag{A8}$$

3. 单电流环逆变器阻抗具体表达式

根据附录 B 表 B1，将逆变器控制参数代入式(5)，以逆变器输出功率及并联台数为变量的逆变器阻抗 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}$ 具体表达式为：

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Ceq}}=\begin{bmatrix} Z_{\mathrm{Ceq}dd} & Z_{\mathrm{Ceq}dq} \\ Z_{\mathrm{Ceq}qd} & Z_{\mathrm{Ceq}qq} \end{bmatrix} \tag{A9}$$

式中各元素表达式分别为：

$$Z_{\mathrm{Ceq}dd}=\frac{\begin{aligned} &I_{od}^{\mathrm{s}}+4.6593\times10^{-4}s+0.0753I_{od}^{\mathrm{s}}s+2.5210\times10^{-5}I_{od}^{\mathrm{s}}s^2+\\ &1.2172\times10^{-8}I_{od}^{\mathrm{s}}s^3+3.0825\times10^{-12}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4+2.1729\times10^{-16}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5+\\ &4.9024\times10^{-21}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6-8.3358\times10^{-25}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7-1.2340\times10^{-28}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8-\\ &4.2912\times10^{-33}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9-4.4314\times10^{-38}I_{od}^{\mathrm{s}}s^{10}-6.0102\times10^{-44}I_{od}^{\mathrm{s}}s^{11}+\\ &3.2627\times10^{-5}s^2-1.7299\times10^{-7}s^3-1.5321\times10^{-10}s^4-\\ &7.3874\times10^{-14}s^5-2.8713\times10^{-17}s^6-6.9407\times10^{-21}s^7-\\ &9.9762\times10^{-25}s^8-9.3304\times10^{-29}s^9-6.1141\times10^{-33}s^{10}-\\ &2.5177\times10^{-37}s^{11}-4.9334\times10^{-42}s^{12}-3.9927\times10^{-47}s^{13}-\\ &9.3406\times10^{-53}s^{14}-6.5858\times10^{-59}s^{15} \end{aligned}}{n\begin{pmatrix} 1.8872\times10^{-7}I_{od}^{\mathrm{s}}s+8.8209\times10^{-11}s^2+6.5302\times10^{-9}I_{od}^{\mathrm{s}}s^2-\\ 5.7528\times10^{-10}I_{od}^{\mathrm{s}}s^3-2.6467\times10^{-13}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4-3.3604\times10^{-17}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5+\\ 1.1903\times10^{-22}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6+2.0268\times10^{-25}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7+8.1872\times10^{-30}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8+\\ 8.8112\times10^{-35}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9+1.2020\times10^{-40}I_{od}^{\mathrm{s}}s^{10}+\\ 2.6204\times10^{-12}s^3-2.8162\times10^{-13}s^4+1.3066\times10^{-15}s^5+\\ 1.3820\times10^{-16}s^6+5.1604\times10^{-22}s^7+9.5153\times10^{-26}s^8+\\ 9.2726\times10^{-30}s^9+4.5521\times10^{-34}s^{10}+9.5123\times10^{-39}s^{11}+\\ 7.9053\times10^{-44}s^{12}+1.8626\times10^{-49}s^{13}+1.3172\times10^{-55}s^{14} \end{pmatrix}} \tag{A10}$$

$$Z_{\mathrm{Ceq}dq}=\frac{\begin{aligned} &-0.188-I_{od}^{\mathrm{s}}-0.0228s-0.0753I_{od}^{\mathrm{s}}s-1.9901\times10^{-5}I_{od}^{\mathrm{s}}s^2+\\ &1.5615\times10^{-8}I_{od}^{\mathrm{s}}s^3+1.0675\times10^{-12}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4+3.8564\times10^{-18}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5-\\ &4.4196\times10^{-22}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6-6.4297\times10^{-25}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7-2.7672\times10^{-29}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8-\\ &3.0735\times10^{-34}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9-4.2131\times10^{-40}I_{od}^{\mathrm{s}}s^{10}-\\ &6.5783\times10^{-4}s^2+4.0313\times10^{-8}s^3+1.6420\times10^{-10}s^4+\\ &1.4653\times10^{-14}s^5-1.9781\times10^{-18}s^6-2.3808\times10^{-22}s^7+\\ &5.4006\times10^{-27}s^8+9.5813\times10^{-31}s^9+2.4754\times10^{-35}s^{10}+\\ &2.1719\times10^{-40}s^{11}+5.1873\times10^{-46}s^{12}+3.6914\times10^{-52}s^{13} \end{aligned}}{n\begin{pmatrix} 0.0038I_{od}^{\mathrm{s}}+1.7748\times10^{-6}s+1.3139\times10^{-4}I_{od}^{\mathrm{s}}s-\\ 1.1575\times10^{-5}I_{od}^{\mathrm{s}}s^2-5.3252\times10^{-9}I_{od}^{\mathrm{s}}s^3-6.7610\times10^{-13}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4-\\ 2.3948\times10^{-18}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5+4.0779\times10^{-21}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6+1.6473\times10^{-25}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7+\\ 1.7728\times10^{-30}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8+2.4185\times10^{-36}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9+5.2722\times10^{-8}s^2-\\ 5.6663\times10^{-9}s^3+2.6288\times10^{-11}s^4+2.7805\times10^{-14}s^5+\\ 1.0383\times10^{-17}s^6+1.9145\times10^{-21}s^7+1.8656\times10^{-25}s^8+\\ 9.1588\times10^{-30}s^9+1.9139\times10^{-34}s^{10}+1.5905\times10^{-39}s^{11}+\\ 3.7475\times10^{-45}s^{12}+2.6501\times10^{-51}s^{13} \end{pmatrix}} \tag{A11}$$

$$Z_{\mathrm{Ceq}qd}=\frac{\left(2s^2+4665s+62200\right)\cdot\begin{pmatrix} -1-0.0401s-1.7740\times10^{-5}s^2-6.1560\times10^{-9}s^3-\\ 5.3046\times10^{-13}s^4+1.1237\times10^{-17}s^5+3.0009\times10^{-21}s^6+\\ 1.7685\times10^{-25}s^7+4.0489\times10^{-30}s^8+3.5723\times10^{-35}s^9+\\ 8.5654\times10^{-41}s^{10}+6.1055\times10^{-47}s^{11} \end{pmatrix}}{n\begin{pmatrix} 1256I_{od}^{\mathrm{s}}+0.5871s+43.4619I_{od}^{\mathrm{s}}s-\\ 3.8288I_{od}^{\mathrm{s}}s^2-0.0018I_{od}^{\mathrm{s}}s^3-2.2365\times10^{-7}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4-\\ 7.9219\times10^{-13}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5+1.3489\times10^{-15}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6+5.4490\times10^{-20}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7+\\ 5.8643\times10^{-25}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8+8.0002\times10^{-31}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9+0.0174s^2-\\ 0.0019s^3+8.6959\times10^{-6}s^4+9.1977\times10^{-9}s^5+\\ 3.4345\times10^{-12}s^6+6.3329\times10^{-16}s^7+6.1714\times10^{-20}s^8+\\ 3.0297\times10^{-24}s^9+6.3310\times10^{-29}s^{10}+5.2614\times10^{-34}s^{11}+\\ 1.2397\times10^{-39}s^{12}+8.7664\times10^{-46}s^{13} \end{pmatrix}} \tag{A12}$$

$$Z_{\mathrm{Ceq}qq}=\frac{\left(2s^2+4665s+62200\right)\cdot\begin{pmatrix} -1+0.0404s+1.9285\times10^{-5}s^2+9.0248\times10^{-9}s^3+\\ 2.6710\times10^{-12}s^4+4.2883\times10^{-16}s^5+4.2564\times10^{-20}s^6+\\ 2.9424\times10^{-24}s^7+1.2743\times10^{-28}s^8+2.5651\times10^{-33}s^9+\\ 2.1042\times10^{-38}s^{10}+4.9414\times10^{-44}s^{11}+3.4898\times10^{-50}s^{12} \end{pmatrix}}{n\begin{pmatrix} 200I_{od}^{\mathrm{s}}+0.0935s+6.9207I_{od}^{\mathrm{s}}s-\\ 0.6097I_{od}^{\mathrm{s}}s^2-2.8050\times10^{-4}I_{od}^{\mathrm{s}}s^3-3.5613\times10^{-8}I_{od}^{\mathrm{s}}s^4-\\ 6.3073\times10^{-17}I_{od}^{\mathrm{s}}s^5+2.1480\times10^{-16}I_{od}^{\mathrm{s}}s^6+8.6767\times10^{-21}I_{od}^{\mathrm{s}}s^7+\\ 9.3381\times10^{-26}I_{od}^{\mathrm{s}}s^8+1.2739\times10^{-31}I_{od}^{\mathrm{s}}s^9+0.0028s^2-\\ 2.9846\times10^{-4}s^3+1.3847\times10^{-6}s^4+7.3230\times10^{-13}s^5+\\ 5.4690\times10^{-13}s^6+1.0084\times10^{-16}s^7+4.9135\times10^{-24}s^8+\\ 4.8243\times10^{-25}s^9+1.0081\times10^{-29}s^{10}+8.3780\times10^{-35}s^{11}+\\ 1.9740\times10^{-40}s^{12}+1.3959\times10^{-46}s^{13} \end{pmatrix}} \tag{A13}$$

4. 强网弱化特性曲面具体表达式

根据附录B表B1，将电网相电压幅值 U_{PCC}=311 V 及电网额定容量 P_{grid}=100 kW 代入式(9)，k_{SCR} 具体表达式为：

$$k_{\mathrm{SCR}}=\frac{0.0968}{\delta_{\mathrm{penetration}}L_{\mathrm{g}}}-\frac{0.000\,968}{L_{\mathrm{g}}} \tag{A14}$$

5. 新能源渗透率特性曲面具体表达式

根据附录 B 表 B1，将单机逆变器额定功率 P_{inv}=18.66 kW 及电网额定容量 P_{grid}=100 kW 代入式(11)，其 $\delta_{\mathrm{penetration}}$ 具体表达式为：

$$\delta_{\mathrm{penetration}}=\frac{n\alpha 18.66}{n\alpha 18.66+100}\times100\% \tag{A15}$$

6. 网侧阻抗具体表达式

根据附录 B 表 B1，将网侧阻抗参数代入式(6)，网侧阻抗具体表达式为：

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{g}}=\begin{bmatrix} 0.0025s & -0.0079 \\ -0.0079 & 0.0025s \end{bmatrix} \tag{A16}$$

7. 分布式阻尼重构控制下逆变器阻抗具体表达式

根据附录 B 表 B1，将逆变器控制参数代入式(14)，以逆变器输出功率、并联台数、阻尼系数为变量的分布式阻尼重构控制下 $\boldsymbol{Z}_{\text{Ceq_revised}}$ 具体表达式为：

$$\boldsymbol{Z}_{\text{Ceq_revised}}=\begin{bmatrix} Z_{\text{Ceq}dd_\text{revised}} & Z_{\text{Ceq}dq_\text{revised}} \\ Z_{\text{Ceq}qd_\text{revised}} & Z_{\text{Ceq}qq_\text{revised}} \end{bmatrix} \tag{A17}$$

式中各元素表达式分别为：

$$\begin{aligned}
Z_{\text{Ceq}dd_\text{revised}}=\;&I_{od}^{s}-4.6593\times10^{-4}s-0.0767I_{od}^{s}s-1.2509\times10^{-4}I_{od}^{s}s^{2}-7.8265\times10^{-8}I_{od}^{s}s^{3}-3.0131\times10^{-11}I_{od}^{s}s^{4}-9.5882\times10^{-15}I_{od}^{s}s^{5}-\\
&1.6344\times10^{-18}I_{od}^{s}s^{6}-1.0029\times10^{-22}I_{od}^{s}s^{7}-9.1176\times10^{-28}I_{od}^{s}s^{8}+5.3029\times10^{-31}I_{od}^{s}s^{9}+5.9462\times10^{-35}I_{od}^{s}s^{10}+1.9278\times10^{-39}I_{od}^{s}s^{11}+\\
&1.9383\times10^{-44}I_{od}^{s}s^{12}+2.6180\times10^{-50}I_{od}^{s}s^{13}-1.6866\times10^{-10}k_{\text{damp}}s^{3}-1.1885\times10^{-11}k_{\text{damp}}s^{4}+5.7437\times10^{-14}k_{\text{damp}}s^{5}+\\
&8.5962\times10^{-17}k_{\text{damp}}s^{6}+3.8351\times10^{-20}k_{\text{damp}}s^{7}+8.5073\times10^{-24}k_{\text{damp}}s^{8}+1.4613\times10^{-27}k_{\text{damp}}s^{9}+1.3581\times10^{-31}k_{\text{damp}}s^{10}-\\
&4.1458\times10^{-36}k_{\text{damp}}s^{11}-1.1852\times10^{-39}k_{\text{damp}}s^{12}-1.9175\times10^{-44}k_{\text{damp}}s^{13}-2.7507\times10^{-50}k_{\text{damp}}s^{14}-3.3242\times10^{-5}s^{2}+1.2972\times10^{-7}s^{3}+\\
&3.6734\times10^{-10}s^{4}+3.5146\times10^{-13}s^{5}+1.9296\times10^{-16}s^{6}+7.7021\times10^{-20}s^{7}+2.2667\times10^{-23}s^{8}+4.4335\times10^{-27}s^{9}+5.6384\times10^{-31}s^{10}+\\
&4.8966\times10^{-35}s^{11}+3.0006\times10^{-39}s^{12}+1.1622\times10^{-43}s^{13}+2.2018\times10^{-48}s^{14}+1.7516\times10^{-53}s^{15}+4.0775\times10^{-59}s^{16}+\\
&2.8688\times10^{-65}s^{17}-1.3104\times10^{-14}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{4}-9.8161\times10^{-15}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{5}+8.6756\times10^{-19}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{6}-8.0507\times10^{-22}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{7}+\\
&9.7266\times10^{-26}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{8}-1.8498\times10^{-29}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{9}+2.4946\times10^{-33}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{10}-9.8914\times10^{-38}k_{\text{damp}}^{2}I_{od}^{s}s^{11}-7.2398\times10^{-7}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{2}-\\
&5.4865\times10^{-8}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{3}-4.2609\times10^{-11}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{4}-9.8917\times10^{-15}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{5}-4.1338\times10^{-18}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{6}-4.8961\times10^{-22}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{7}-\\
&1.0142\times10^{-25}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{8}-6.0321\times10^{-30}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{9}-9.4362\times10^{-36}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{10}+3.0803\times10^{-38}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{11}+4.5933\times10^{-42}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{12}+\\
&7.2101\times10^{-47}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{13}+1.0315\times10^{-52}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{14}\\
&-\frac{}{ns^{2}\left(\begin{array}{l}
6.2276\times10^{-6}I_{od}^{s}+2.9109\times10^{-9}s+2.1961\times10^{-7}I_{od}^{s}s-1.8842\times10^{-8}I_{od}^{s}s^{2}-2.1264\times10^{-11}I_{od}^{s}s^{3}-6.8735\times10^{-15}I_{od}^{s}s^{4}-\\
7.3582\times10^{-19}I_{od}^{s}s^{5}+4.0960\times10^{-24}I_{od}^{s}s^{6}+4.6846\times10^{-27}I_{od}^{s}s^{7}+1.8122\times10^{-31}I_{od}^{s}s^{8}+1.9230\times10^{-36}I_{od}^{s}s^{9}+2.6180\times10^{-42}I_{od}^{s}s^{10}+\\
8.8394\times10^{-11}s^{2}-9.2365\times10^{-12}s^{3}+3.6983\times10^{-14}s^{4}+7.4062\times10^{-17}s^{5}+4.7129\times10^{-20}s^{6}+1.4379\times10^{-23}s^{7}+2.3784\times10^{-27}s^{8}+\\
2.1698\times10^{-31}s^{9}+1.0228\times10^{-35}s^{10}+2.0979\times10^{-40}s^{11}+1.7279\times10^{-45}s^{12}+4.0611\times10^{-51}s^{13}+2.8688\times10^{-57}s^{14}+\\
2.2543\times10^{-12}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{2}+7.7570\times10^{-14}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{3}-6.8849\times10^{-15}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{4}-1.6593\times10^{-18}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{5}-3.4801\times10^{-22}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{6}-\\
5.2147\times10^{-26}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{7}-6.9320\times10^{-32}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{8}+4.1698\times10^{-34}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{9}+7.1512\times10^{-39}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{10}+1.0315\times10^{-44}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{11}
\end{array}\right)}
\end{aligned} \tag{A18}$$

$$\begin{aligned}
Z_{\text{Ceq}dq_\text{revised}}=\;&1+5.3182I_{od}^{s}+0.1222s+0.4038I_{od}^{s}s+3.7003\times10^{-4}I_{od}^{s}s^{2}-1.3194\times10^{-8}I_{od}^{s}s^{3}-6.0487\times10^{-11}I_{od}^{s}s^{4}-3.9520\times10^{-15}I_{od}^{s}s^{5}-\\
&1.3301\times10^{-19}I_{od}^{s}s^{6}+4.9707\times10^{-24}I_{od}^{s}s^{7}+2.4040\times10^{-27}I_{od}^{s}s^{8}+9.8765\times10^{-32}I_{od}^{s}s^{9}+1.0810\times10^{-36}I_{od}^{s}s^{10}+1.4788\times10^{-42}I_{od}^{s}s^{11}+\\
&3.6199\times10^{-7}k_{\text{damp}}s^{2}+4.1656\times10^{-8}k_{\text{damp}}s^{3}+1.1006\times10^{-9}k_{\text{damp}}s^{4}+5.3529\times10^{-13}k_{\text{damp}}s^{5}+7.0490\times10^{-17}k_{\text{damp}}s^{6}+1.8738\times10^{-20}k_{\text{damp}}s^{7}+\\
&2.0757\times10^{-25}k_{\text{damp}}s^{8}-1.1697\times10^{-28}k_{\text{damp}}s^{9}-3.5868\times10^{-33}k_{\text{damp}}s^{10}-3.0242\times10^{-38}k_{\text{damp}}s^{11}-3.9489\times10^{-44}k_{\text{damp}}s^{12}+\\
&0.0036s^{2}+2.0946\times10^{-6}s^{3}-1.0148\times10^{-9}s^{4}-6.5428\times10^{-13}s^{5}-4.0911\times10^{-17}s^{6}+8.2093\times10^{-21}s^{7}+8.0696\times10^{-25}s^{8}-\\
&2.4052\times10^{-29}s^{9}-3.4947\times10^{-33}s^{10}-8.8040\times10^{-38}s^{11}-7.6510\times10^{-43}s^{12}-1.8227\times10^{-48}s^{13}-1.2957\times10^{-54}s^{14}+\\
&1.9251\times10^{-6}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{2}+1.4454\times10^{-7}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{3}+1.1520\times10^{-11}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{4}+8.2213\times10^{-15}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{5}+3.8694\times10^{-19}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{6}+\\
&6.6390\times10^{-23}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{7}+4.6283\times10^{-28}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{8}-6.3826\times10^{-31}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{9}-1.6872\times10^{-35}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{10}-1.1835\times10^{-40}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{11}-\\
&1.4808\times10^{-46}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{12}\\
&-\frac{}{n\left(\begin{array}{l}
0.0202I_{od}^{s}+9.4385\times10^{-6}s+7.1207\times10^{-4}I_{od}^{s}s-6.1095\times10^{-5}I_{od}^{s}s^{2}-6.8947\times10^{-8}I_{od}^{s}s^{3}-2.2287\times10^{-11}I_{od}^{s}s^{4}-\\
2.3859\times10^{-15}I_{od}^{s}s^{5}+1.3281\times10^{-20}I_{od}^{s}s^{6}+1.5190\times10^{-23}I_{od}^{s}s^{7}+5.8762\times10^{-28}I_{od}^{s}s^{8}+6.2354\times10^{-33}I_{od}^{s}s^{9}+8.4889\times10^{-39}I_{od}^{s}s^{10}+\\
2.8662\times10^{-7}s^{2}-2.9949\times10^{-8}s^{3}+1.1992\times10^{-10}s^{4}+2.4014\times10^{-13}s^{5}+1.5281\times10^{-16}s^{6}+4.6625\times10^{-20}s^{7}+7.7120\times10^{-24}s^{8}+\\
7.0355\times10^{-28}s^{9}+3.3165\times10^{-32}s^{10}+6.8023\times10^{-37}s^{11}+5.6028\times10^{-42}s^{12}+1.3168\times10^{-47}s^{13}+9.3020\times10^{-54}s^{14}+\\
7.3097\times10^{-9}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{2}+2.5152\times10^{-10}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{3}-2.2324\times10^{-11}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{4}-5.3803\times10^{-15}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{5}-1.1284\times10^{-18}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{6}-\\
1.6908\times10^{-22}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{7}-2.2477\times10^{-28}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{8}+1.3521\times10^{-30}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{9}+2.3188\times10^{-35}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{10}+3.3447\times10^{-41}k_{\text{damp}}I_{od}^{s}s^{11}
\end{array}\right)}
\end{aligned} \tag{A19}$$

$$Z_{\mathrm{Ceqqd_revised}}=-\frac{\left(2s^2+4665s+62200\right)\cdot\left(\begin{array}{l}1+0.0408s+3.6199\times10^{-7}k_{\mathrm{damp}}s^2+1.4507\times10^{-8}k_{\mathrm{damp}}s^3+9.1033\times10^{-13}k_{\mathrm{damp}}s^4+5.4939\times10^{-16}k_{\mathrm{damp}}s^5+\\1.4349\times10^{-20}k_{\mathrm{damp}}s^6-3.3827\times10^{-24}k_{\mathrm{damp}}s^7-1.0936\times10^{-28}k_{\mathrm{damp}}s^8-9.3767\times10^{-34}k_{\mathrm{damp}}s^9-1.2281\times10^{-39}k_{\mathrm{damp}}s^{10}+\\4.4230\times10^{-5}s^2+1.7864\times10^{-8}s^3+4.5934\times10^{-12}s^4+3.3887\times10^{-16}s^5-1.0417\times10^{-20}s^6-2.1574\times10^{-24}s^7-\\1.2077\times10^{-28}s^8-2.7080\times10^{-33}s^9-2.3663\times10^{-38}s^{10}-5.6593\times10^{-44}s^{11}-4.0296\times10^{-50}s^{12}\end{array}\right)}{n\left(\begin{array}{l}1256I_{od}^{s}+0.5871s+44.2909I_{od}^{s}s-3.8001I_{od}^{s}s^2-0.0043I_{od}^{s}s^3-1.3863\times10^{-6}I_{od}^{s}s^4-1.4840\times10^{-10}I_{od}^{s}s^5+\\8.2610\times10^{-16}I_{od}^{s}s^6+9.4480\times10^{-19}I_{od}^{s}s^7+3.6550\times10^{-23}I_{od}^{s}s^8+3.8784\times10^{-28}I_{od}^{s}s^9+5.2801\times10^{-34}I_{od}^{s}s^{10}+\\0.0178s^2-0.0019s^3+7.4588\times10^{-6}s^4+1.4937\times10^{-8}s^5+9.5050\times10^{-12}s^6+2.9001\times10^{-15}s^7+4.7969\times10^{-19}s^8+\\4.3761\times10^{-23}s^9+2.0629\times10^{-27}s^{10}+4.2310\times10^{-32}s^{11}+3.4849\times10^{-37}s^{12}+8.1905\times10^{-43}s^{13}+5.7859\times10^{-49}s^{14}+\\4.5466\times10^{-4}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^2+1.5645\times10^{-5}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^3-1.3886\times10^{-6}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^4-3.3465\times10^{-10}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^5-\\7.0188\times10^{-14}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^6-1.0517\times10^{-17}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^7-1.3981\times10^{-23}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^8+8.4099\times10^{-26}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^9+\\1.4423\times10^{-30}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^{10}+2.0804\times10^{-36}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^{11}\end{array}\right)}\tag{A20}$$

$$Z_{\mathrm{Ceqqq_revised}}=-\frac{\left(2s^2+4665s+62200\right)\cdot\left(\begin{array}{l}-1+0.0397s-3.6199\times10^{-7}k_{\mathrm{damp}}s^2+1.4693\times10^{-8}k_{\mathrm{damp}}s^3+3.5427\times10^{-12}k_{\mathrm{damp}}s^4+7.4361\times10^{-16}k_{\mathrm{damp}}s^5+\\1.1164\times10^{-19}k_{\mathrm{damp}}s^6+1.6032\times10^{-25}k_{\mathrm{damp}}s^7-8.9256\times10^{-28}k_{\mathrm{damp}}s^8-1.5310\times10^{-32}k_{\mathrm{damp}}s^9-2.2085\times10^{-38}k_{\mathrm{damp}}s^{10}+\\4.5944\times10^{-5}s^2+2.1753\times10^{-8}s^3+8.6273\times10^{-12}s^4+2.1917\times10^{-15}s^5+3.2559\times10^{-19}s^6+3.1035\times10^{-23}s^7+\\2.0694\times10^{-27}s^8+8.6668\times10^{-32}s^9+1.7140\times10^{-36}s^{10}+1.3937\times10^{-41}s^{11}+3.2648\times10^{-47}s^{12}+2.3033\times10^{-53}s^{13}\end{array}\right)}{n\left(\begin{array}{l}200I_{od}^{s}+0.0935s+7.0527I_{od}^{s}s-0.6051I_{od}^{s}s^2-6.8289\times10^{-4}I_{od}^{s}s^3-2.2074\times10^{-7}I_{od}^{s}s^4-2.3631\times10^{-11}I_{od}^{s}s^5+\\1.3154\times10^{-16}I_{od}^{s}s^6+1.5045\times10^{-19}I_{od}^{s}s^7+5.8200\times10^{-24}I_{od}^{s}s^8+6.1759\times10^{-29}I_{od}^{s}s^9+8.4078\times10^{-35}I_{od}^{s}s^{10}+\\0.0028s^2-2.9663\times10^{-4}s^3+1.1877\times10^{-6}s^4+2.3785\times10^{-9}s^5+1.5135\times10^{-12}s^6+4.6180\times10^{-16}s^7+\\7.6383\times10^{-20}s^8+6.9683\times10^{-24}s^9+3.2848\times10^{-28}s^{10}+6.7373\times10^{-33}s^{11}+5.5492\times10^{-38}s^{12}+1.3042\times10^{-43}s^{13}+\\9.2131\times10^{-50}s^{14}+7.2398\times10^{-5}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^2+2.4912\times10^{-6}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^3-2.2111\times10^{-7}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^4-5.3289\times10^{-11}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^5-\\1.1176\times10^{-14}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^6-1.6747\times10^{-18}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^7-2.2262\times10^{-24}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^8+1.3391\times10^{-26}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^9+\\2.2966\times10^{-31}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^{10}+3.3127\times10^{-37}k_{\mathrm{damp}}I_{od}^{s}s^{11}\end{array}\right)}\tag{A21}$$

8. 闭环传函 F_r 具体表达式

根据附录 B 表 B1，将 k_{pwm}=400、k_{p}=0.0115、k_{i}=55.25、L_{f}=3 mH、C_{f}=14.1 μF、R_{d}=2 Ω、L_{t}=0.5 mH、T_{s}=0.000 05 s 等算例具体参数带入式(17)，可得：

$$F_{\mathrm{r}}(s)=\frac{\left(\begin{array}{l}1.6457\times10^{-14}s^4+2.1688\times10^{-10}s^3+\\1.4927\times10^{-5}s^2+0.0682s+1\end{array}\right)}{\left(\begin{array}{l}0.0682s+8.7562\times10^{-6}k_{\mathrm{damp}}s^2-6.2913\times10^{-11}k_{\mathrm{damp}}s^3+\\3.6043\times10^{-13}k_{\mathrm{damp}}s^4-1.3890\times10^{-17}k_{\mathrm{damp}}s^5+\\1.5947\times10^{-5}s^2+1.1692\times10^{-8}s^3+7.8154\times10^{-13}s^4+\\8.4784\times10^{-17}s^5+2.6832\times10^{-21}s^6+1\end{array}\right)}\tag{A22}$$

附录 B

表 B1　并网系统参数

Table B1　Parameters of grid-connected system

参数	取值
逆变器侧滤波电感 L_{f}/mH	3
网侧滤波电感 L_{t}/mH	0.5
滤波电容 C_{f}/μF	14.1
滤波器阻尼电阻 R_{d}/Ω	2
锁相环比例系数 $k_{\mathrm{p_pll}}$	7.5
锁相环积分系数 $k_{\mathrm{i_pll}}$	100
电流环比例系数 k_{p}	0.0115
电流环积分系数 k_{i}	55.25

续表 B1

参数	取值
d 轴电流 I_{od}^{s} /A	40
q 轴电流 I_{oq}^{s} /A	0
开关频率 f_{s}/kHz	20
电网额定功率 P_{grid}/kW	100
电网相电压幅值 U_{PCC}/V	311
逆变器额定容量 P_{inv}/kW	18.66

表 B2　调控指标对比

Table B2　Comparison of the power dispatch indexes

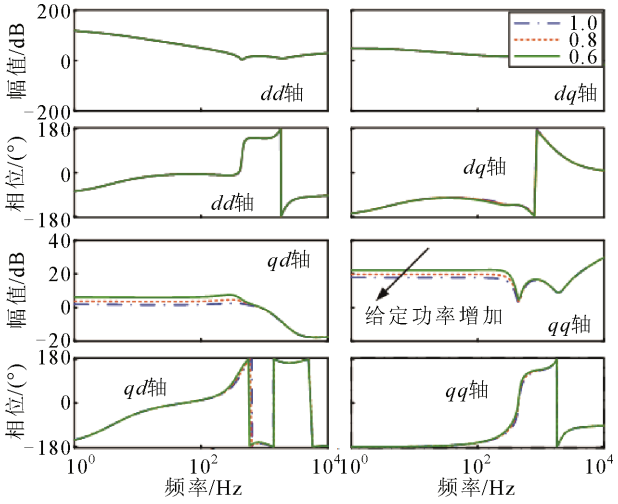
控制类型	P_{outmax}	n	$\delta_{\mathrm{penetration}}$/%	λ_{pu}
电流环控制	1	3	35.89	1
电流环控制	0.8	4	37.39	0.8
电流环控制	0.6	7	43.94	0.6
阻尼重构控制	1	6	52.82	1(最优)

表 B3　实验平台参数

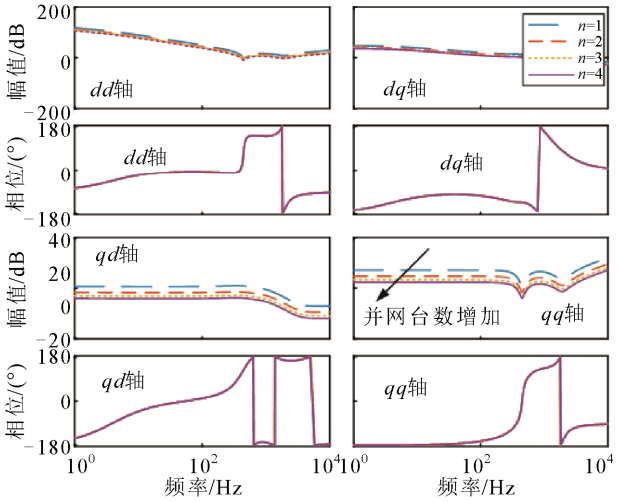
Table B3　Parameters of experimental platform

参数	取值
电网频率/Hz	50
电网相电压/V	50
直流电压/V	150
开关频率/kHz	20
逆变器侧滤波电感/mH	3
网侧滤波电感/mH	0.5
滤波电容/μF	14.1
滤波器阻尼电阻/Ω	2
额定电流/A	2

附录 C



(a) 单机逆变器给定功率变化



(b) 并网逆变器台数变化

图 C1　不同发电功率下阻抗 Bode 图

Fig.C1　Bode diagrams of impedances with different output powers

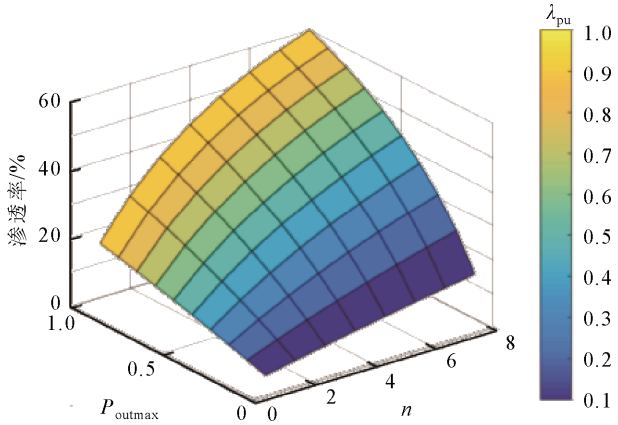


图 C2　新能源渗透率特性

Fig.C2　Characteristics of new energy penetration

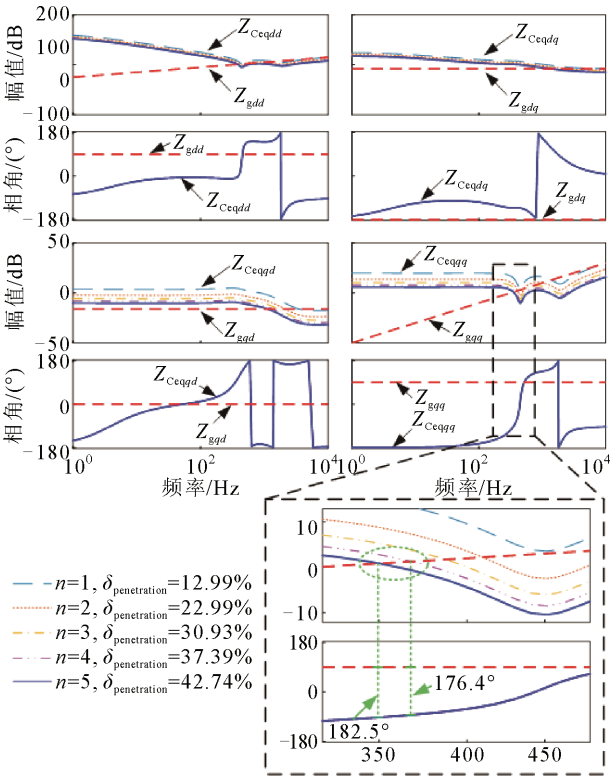


图 C3　P_{outmax}=0.8 时不同渗透率下的阻抗 Bode 图

Fig.C3　Bode diagrams of impedances with different penetrations when P_{outmax}=0.8

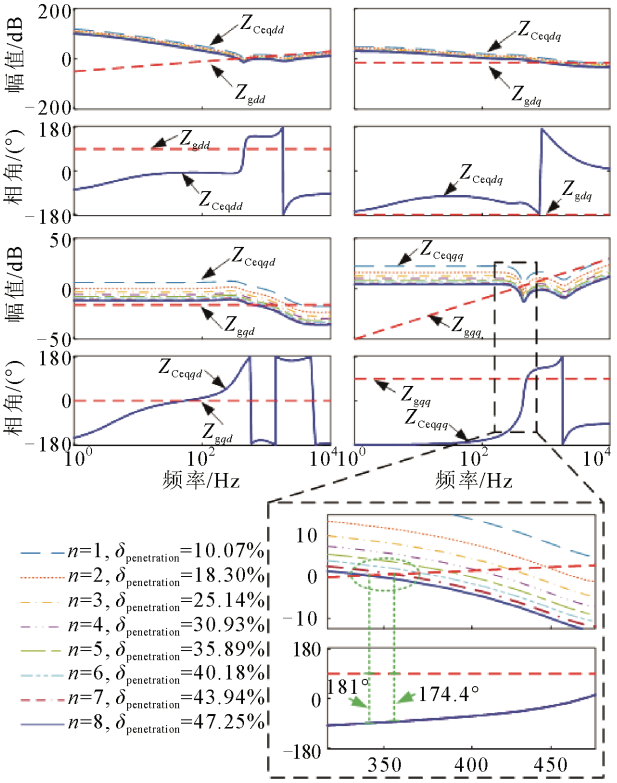
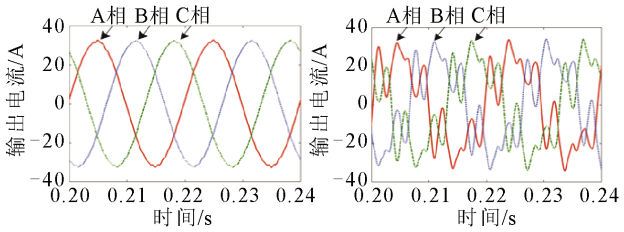


图 C4　P_{outmax}=0.6 时不同渗透率下的阻抗 Bode 图

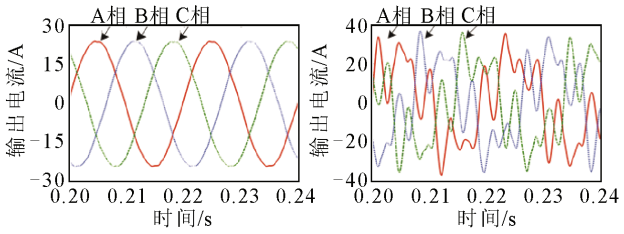
Fig.C4　Bode diagrams of impedances with different penetrations, P_{outmax}=0.6



(a) n=4, $\delta_{penetration}$=37.39%　(b) n=5, $\delta_{penetration}$=42.74%

图 C5　P_{outmax}=0.8 时常规控制下逆变器端口电流波形

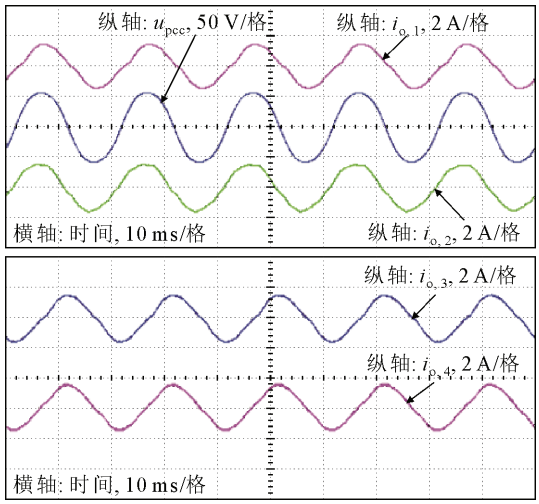
Fig.C5　Output current waveforms of the inverter based on conventional control when P_{outmax}=0.8



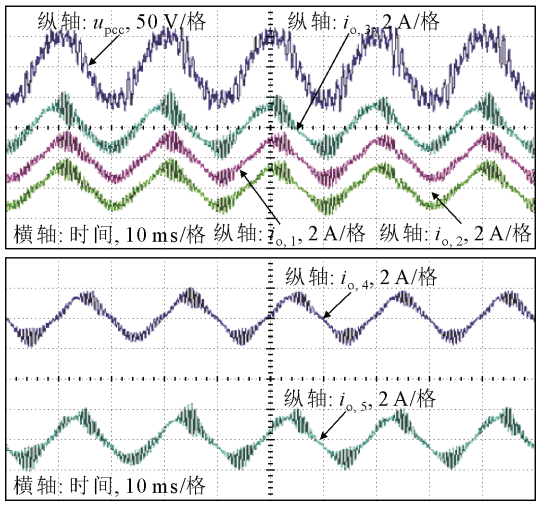
(a) n=7, $\delta_{penetration}$=43.94%　(b) n=8, $\delta_{penetration}$=47.25%

图 C6　P_{outmax}=0.6 时常规控制下逆变器端口电流波形

Fig.C6　Output current waveforms of the inverter based on conventional control when P_{outmax}=0.6



(a) P_{outmax}=0.8, n=4



(b) P_{outmax}=0.8, n=5

图 C7　P_{outmax}=0.8 时单电流环实验波形

Fig.C7　Experiment waveforms based on current control loop when P_{outmax}=0.8