



面向弱电网构网型储能测试的虚实阻抗协同短路比连续模拟方法研究

宗思佳, 亚夏尔·吐尔洪, 李义岩, 苏麦雅·艾克帕尔, 甫日甫才仁, 赵清华, 郑云平
(国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830063)

摘要: 为解决构网型储能涉网试验中电网强度难以宽范围连续调节的问题, 提出一种虚实阻抗协同的短路比连续模拟方法。针对固定物理阻抗调节离散、投切冲击及纯虚拟阻抗受数字延时影响易产生负阻尼的问题, 分析两类传统方案的机理与局限。设计按1、2、4二进制权重配置的3-bit级联物理阻抗网络, 提供真实阻尼和稳态潮流约束; 在电网模拟源底层引入连续控制集模型预测控制, 提高虚拟阻抗指令的动态跟踪能力。进一步提出物理阻抗档位与虚拟阻抗增益协同解算方法, 将目标阻抗分解为整数物理档位和连续虚拟补偿量, 通过限幅、二进制译码及边界处理, 实现短路比在8.0至1.0范围内连续调节。基于全电磁暂态模型, 设置短路比连续变化、阶跃突变、频率阶跃及电压跌落等工况, 并与固定物理阻抗法和纯虚拟阻抗法对比。结果表明, 所提方法能够连续复现目标阻抗变化, 减弱档位切换产生的暂态失配, 抑制极弱电网下的电流过冲与低频功率振荡。该方法兼顾物理阻尼和虚拟阻抗连续调节能力, 可为构网型储能弱电网涉网试验提供连续、可控的阻抗环境及暂态性能评估条件。

关键词: 构网型储能; 极弱电网; 短路比连续模拟; 虚实阻抗协同调控; 涉网性能测试; 模型预测控制

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0675

中图分类号: TM 74

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-14

Continuous Short-Circuit Ratio Simulation Based on Coordinated Physical-Virtual Impedance for Grid-Forming Energy Storage Testing in Weak Grids

Zong Sijia, Yaxar Turgun, Li Yiyan, Akpar Sumaiya, Puripu Cairen, Zhao Qinghua, Zheng Yunping

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Science Research Institute, Urumchi 830063, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract: To enable wide-range and continuous grid-strength emulation for grid-forming energy-storage testing, a continuous short-circuit ratio method based on coordinated physical and virtual impedance is proposed. The mechanisms and limitations of fixed physical impedance, including discrete adjustment and switching transients, and pure virtual impedance, including delay-induced negative damping, are analyzed. A 3-bit cascaded physical-impedance network with binary weights of 1, 2, and 4 provides physical damping and steady-state power-flow constraints. Continuous-control-set model predictive control is

收稿日期: 2026-07-31; 修改稿日期: 2026-09-16。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助 (SGXJDK00XXJS2600047)。

第一作者: 宗思佳 (1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为新能源及储能技术, E-mail: 313399288@qq.com; 通信作者: 宗思佳, 助理工程师, 研究方向为新能源及储能技术, E-mail: 313399288@qq.com。

引用本文: 宗思佳, 亚夏尔·吐尔洪, 李义岩, 等. 面向弱电网构网型储能测试的虚实阻抗协同短路比连续模拟方法研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX (XX): 1-14.

Citation: Zong Sijia, Yaxar Turgun, Li Yiyan, et al. Continuous Short-Circuit Ratio Simulation Based on Coordinated Physical-Virtual Impedance for Grid-Forming Energy Storage Testing in Weak Grids[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-14.

incorporated into the grid simulator to improve the dynamic tracking of virtual-impedance commands. A coordinated calculation method decomposes the target impedance into an integer physical level and a continuous virtual compensation component. Limiting, binary decoding, and boundary handling enable continuous SCR adjustment from 8.0 to 1.0. Electromagnetic-transient simulations are conducted under continuous SCR variation, an SCR step, a frequency step, and a voltage sag, with fixed physical-impedance and pure virtual-impedance methods used for comparison. The results show that the proposed method reproduces continuous target-impedance variation, mitigates transient mismatch during physical-level switching, and suppresses current overshoot and low-frequency power oscillations under extremely weak grid conditions. The method combines physical damping with continuous virtual adjustment and provides a controllable impedance environment for transient performance evaluation of grid-forming energy storage under weak-grid conditions.

Keywords: Grid-forming energy storage; extremely weak grid; continuous short-circuit ratio (SCR) emulation; virtual and physical impedance coordinated control; grid-connected performance testing; model predictive control

随着新能源装机规模扩大及远距离输电需求增加,并网点短路比(SCR)不断降低,部分区域呈现典型弱电网特征^[1-2]。传统跟网型变流器在弱电网下易引发功率振荡,而构网型(GFM)变流器因具备主动电压和频率支撑能力,已成为提升系统弱电网适应性的关键技术^[3-4]。为保障其工程应用可靠性,需在不同电网强度及暂态扰动下对其开展涉网性能测试^[5-6]。

构建宽范围、连续可调的电网等效阻抗环境是测试的关键。现有SCR模拟方法主要分为物理阻抗模拟与虚拟阻抗模拟。前者依赖硬件元件分级投切,虽能提供真实的瞬态阻尼,但调节离散且伴随拓扑切换冲击^[7-8];后者通过变流器数字控制重塑输出阻抗,调节灵活,但在模拟极弱电网对应的大感抗时,数字延时容易引发负阻尼效应及系统高频失稳^[9-10]。因此,探寻物理与虚拟阻抗的有效融合机制,实现宽范围SCR的连续平滑模拟,是当前亟待解决的技术问题。

此外,极弱电网下GFM变流器的控制耦合较深,在面临电网频率或电压扰动时易产生暂态过流与低频振荡^[11-13]。为精准复现交互特征,电网模拟平台需具备较快的动态响应能力。传统基于双闭环PI控制的模拟源受输出滤波电抗制约,难以满足暂态虚拟阻抗的高频跟踪需求^[14,15,16]。因此,优化模拟源底层控制、构建软硬件协同机制,对提升模拟平台的暂态适应性具有重要意义。

面向上述需求,本文提出一种物理与虚拟阻抗协同的短路比连续模拟方法。系统以3-bit二进制级联物理阻抗网络提供稳态阻尼基准,并在电网模拟源底层引入连续集模型预测控制(MPC)以减小动态跟踪延时^[20]。通过设计“实物粗调+虚拟细调”的协同解算算法,实现戴维南等效阻抗的无级连续重构。最后,基于全电磁暂态仿真平台,在多种典型扰动工况下对比分析了所提方法的动态外特性,验证了其在构网型设备涉网试验中的可行性与有效性。

1 短路比模拟方法机理分析与系统总体架构

构建宽范围、连续可调的电网等效阻抗环境是构网型变流器涉网试验的重要要求。现有短路容量模拟技术主要包括物理阻抗模拟与虚拟阻抗模拟。本章从等效电路与控制稳定性机理出发,剖析前两者的局限性,论证虚实协同架构的必要性,并确立测试系统的总体拓扑。

1.1 传统固定物理阻抗模拟机理与局限性

在三相交流电力系统中,并网点(PCC)的短路比(SCR)作为表征电网强弱的重要指标,与电网等效戴维南阻抗 Z_g 呈反比例关系^[17]。鉴于不同并网装置及控制策略的稳定临界值存在差异,本文将 $1.0 \leq \text{SCR} < 2.0$ 的工况定义为极弱电网、 $2.0 \leq \text{SCR} < 3.0$ 定义为弱电网,并将 $\text{SCR} \geq 3.0$ 作为中等强度及

以上电网，该分区仅用于本文测试工况的分类。其标么值数学定义可表示为：

$$SCR = \frac{S_{sc}}{P_n} = \frac{V_N^2}{Z_g P_n} \quad (1)$$

式中， S_{sc} 为并网点的短路容量； P_n 为被测新能源装备的额定有功功率； V_N 为电网额定线电压。真实物理阻抗模拟法基于该基本定义，主要通过实验室环境中配置大容量的空心电抗器与功率电阻器阵列，并利用接触器或断路器等机械开关进行分级投切，以改变接入主回路的硬件阻抗，从而实现SCR的切换。

该方法的优势在于物理元件能够提供固有的有功阻尼，且其对系统潮流的约束完全遵循基尔霍夫定律。由于该过程不涉及高频数字反馈闭环，因此在模拟极低短路比工况时，系统能够保持良好的高频稳定性。目前，该方案常被应用于含物理实物的硬件在环（PHIL）仿真平台中，作为基础阻抗网络。

然而，在针对构网型变流器进行电网强度动态演化的暂态模拟时，传统物理阻抗法存在固有的理论与工程局限性：

在实际工程实现中，测试平台通常由 n 组物理阻抗支路并联或串联组成，各支路的固定阻抗值为 Z_i ，对应的受控开关状态字为 $S_i \in \{0, 1\}$ 。则该测试平台能够提供的等效短路比集合构成一个有限的离散数学集：

$$S_{scr} = \left\{ \frac{V_N^2}{P_n \sum_{i=1}^n S_i Z_i}, S_i \in \{0, 1\} \right\} \quad (2)$$

由于 S_{scr} 属于有理数集的离散子集，在数学上无法实现对连续实数域 $\mathbf{R}$ 的全覆盖。这意味着系统仅能输出离散的阶梯状阻抗值，难以避免调节盲区。在测试构网型变流器应对电网强度平滑劣化的自适应控制策略时，离散的测试点无法提供连续的动态交互特征。

当测试系统在运行过程中进行物理档位切换时（设切换动作发生在 $t=0$ 时刻），系统总等效电感将由 L_1 阶跃至 L_2 。根据基本电路定律与磁链（ $\psi=L_i$ ）守恒原则，含有电感的网络在发生拓扑突变时，电感电流在换路瞬间无法发生突变，即 $i_L(0^+)=i_L(0^-)$ 。

在开关断开或闭合的暂态过程中，线路中原本储存的磁场能量需进行强制的重新分配。根据暂态

过电压公式：

$$u_L(t) = L \frac{di_L}{dt} \approx \frac{\Delta\psi}{\Delta t} \quad (3)$$

在开关动作的极短时间 Δt 内，电流变化率 di/dt 显著增大。这导致在断路器两端及并网点激发电态过电压与冲击涌流。此类由硬件拓扑突变引发的暂态冲击，易对被测设备的锁相环同步过程产生干扰，或者触发被测设备的硬件过流、过压保护，导致无法准确评估变流器本身的涉网控制性能，其离散切换暂态机理如图1所示。

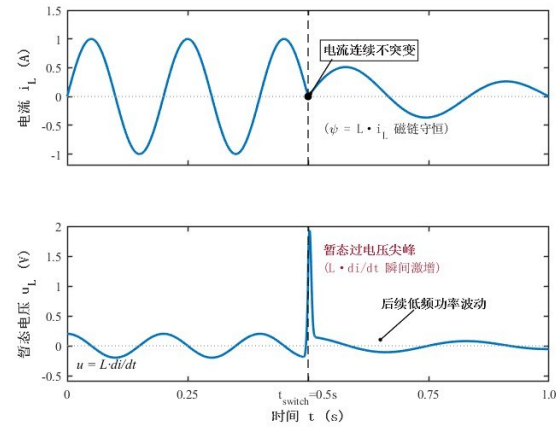


图1 传统物理阻抗离散切换暂态机理波形图
Fig. 1 Waveforms illustrating the transient mechanism of discrete switching in conventional physical-impedance systems.

1.2 纯虚拟阻抗模拟机理与失稳风险分析

为规避物理阻抗机械投切带来的暂态冲击与调节离散问题，连续虚拟阻抗模拟技术提供了一种基于数字控制的替代方案^[18-19]。该技术依托于工作在电压源模式的电网模拟变流器（Grid Simulator），通过修改其底层的数字控制环路重塑系统的等效输出阻抗^[20]。

通过实时采集模拟变流器输出端的三相线路电流反馈值 I_{line} ，并在数字信号处理器（DSP）内构建一个等效的虚拟电压降落分量。将该分量从模拟器的空载理想输出电压参考指令 V_g^* 中减去，生成修正后的变流器调制指令 V_{ref}^* ：

$$V_{ref}^*(s) = V_g^*(s) - I_{line}(s)Z_v(s) \quad (4)$$

式中， $Z_v(s)=R_v+sL_v$ 为复频域下设定的连续虚拟阻抗函数。该方法将物理阻抗的压降效应抽象为控制算法中的浮点乘积项，从而消除了硬件机械开关，理论上具备较高分辨率的SCR平滑调控能力，

考虑控制延时的系统闭环结构如图2所示。

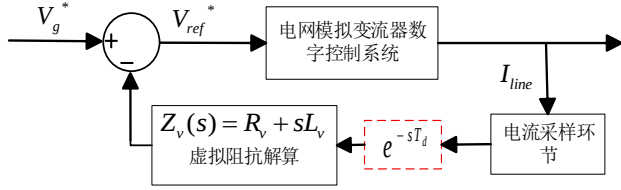


图2 考虑控制延时的虚拟阻抗闭环结构框图

Fig. 2 Block diagram of the virtual-impedance closed-loop structure considering control delay.

尽管虚拟阻抗技术在稳态调节灵活性上具有优势，但从闭环控制系统稳定性的角度分析，该方法在模拟极弱电网工况时受到较大约束。

在实际的数字控制系统中，A/D采样、数字运算处理以及脉宽调制（PWM）环节不可避免地会引入数字控制延时（总延时通常等效为 T_d ）。考虑该延时环节传递函数 $G_d(s) = e^{-sT_d}$ ，逆变器交流端口实际呈现出的等效虚拟阻抗 $Z_{v,eq}$ 可表示为：

$$Z_{v,eq}(s) = Z_v(s) \cdot e^{-sT_d} = (R_v + sL_v)e^{-sT_d} \quad (5)$$

在频域条件下（令 $s = j\omega$ ），利用欧拉公式对延时环节进行展开，并提取该等效阻抗的实部（即系统等效有功阻尼）：

$$R_{eq}(\omega) = \text{Re} \{ (R_v + j\omega L_v)(\cos(\omega T_d) - j\sin(\omega T_d)) \} \quad (6)$$

$$R_{eq}(\omega) = R_v \cos(\omega T_d) + \omega L_v \sin(\omega T_d) \quad (7)$$

在模拟典型的弱电网高感抗工况时，线路等效电阻通常较小，设定 $R_v \approx 0$ 。此时系统的等效有功电阻可近似为：

$$R_{eq}(\omega) \approx \omega L_v \sin(\omega T_d) \quad (8)$$

该表达式揭示了虚拟阻抗稳定性的制约因素。当系统运行频率 ω 升高，特别是在接近模拟变流器自带LCL输出滤波器的谐振频率 ω_{res} 附近时，若满足 $\omega_{res}T_d > \pi$ 的相位条件，正弦项 $\sin(\omega T_d)$ 将变为负值。在此高频段内，等效有功电阻 $R_{eq}(\omega) < 0$ ，意味着原本用于模拟感性压降的虚拟电感，在数字延时的作用下转化为向系统注入能量的负阻尼特性，具体的等效有功阻尼频域特性如图3所示。

随着测试目标短路比SCR的不断降低，所需模拟的等效感抗 L_v 相应增加。当高频段注入的负阻尼能量超过了系统物理回路（如滤波电感、线路导体）固有的寄生正阻尼时，系统闭环极点将向右半平面（RHP）移动，进而削减系统的相位裕度。这容易激发控制环路与物理滤波器的交互谐振，导致

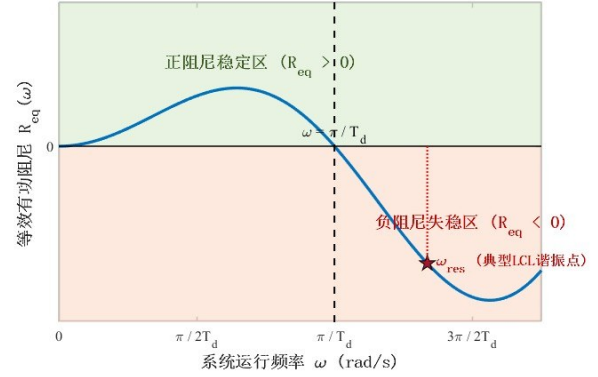


图3 纯虚拟阻抗等效有功阻尼频域特性曲线

Fig. 3 Frequency-domain characteristics of the equivalent active damping for purely virtual impedance.

测试系统发生宽频带失稳。因此，纯虚拟阻抗技术通常适用于强电网或中等强度电网（如 $SCR \geq 3.0$ ）的平滑切换测试，难以独立承担极弱电网下的高保真模拟任务。

1.3 虚实阻抗协同模拟机理与稳定性分析

针对纯物理模拟离散跳变的固有缺陷以及纯虚拟模拟在高频段易发散的控制风险，本文提出一种基于真实阻抗与虚拟阻抗协同调控的连续模拟架构。该方法从系统戴维南等效阻抗的构成机理出发，将连续变化的宏观总阻抗需求 Z_{eq} 解构为物理基准层与虚拟补偿层：

$$Z_{eq}(s) = D \cdot Z_{base}(s) + K \cdot Z_{base}(s) \quad (9)$$

式中， $Z_{base}(s) = R_{base} + sL_{base}$ 为系统设定的单组基准物理阻抗；D为控制离散物理网络的整数档位状态标量（本文采用3-bit网络，则 $D \in \{0, 1, \dots, 7\}$ ）；K为赋予电网模拟变流器的连续虚拟补偿增益系数，且被严格限制在 $K \in [0, 1)$ 的半开区间内。

该协同机制的控制论重点在于，通过“实物粗调+虚拟细调”的分配解算，在消除阻抗调节盲区的同时，从数学机理上规避了纯虚拟阻抗的负阻尼失稳隐患。

根据2.2节的推导分析，单一虚拟阻抗失稳的根本原因在于，随着目标短路比SCR的降低，所需模拟的等效电感 L_v 趋于极大。而在本文的协同架构中，绝大部分的短路容量限制由物理档位D承担。由于K被恒定约束在1.0以下，模拟变流器数字环路所需承担的虚拟电感被设立了严格的上确界：

$$L_{v_max} = \sup(K \cdot L_{base}) < L_{base} \quad (10)$$

系统在任意运行频率 ω 下，呈现出的总等效有功阻尼 $R_{total}(\omega)$ 为物理真实阻尼与虚拟等效阻尼的线性叠加：

$$R_{total}(\omega) = D \cdot R_{base} + R_{v_eq}(\omega) \quad (11)$$

$$R_{total}(\omega) \approx D \cdot R_{base} + \omega(K \cdot L_{base}) \sin(\omega T_d) \quad (12)$$

为保证闭环系统在全频段内的绝对稳定性，根据无源性判据，网络端口向外呈现的总阻抗实部必须恒大于零，即要求 $R_{total}(\omega) > 0$ 恒成立。在极端工况下，即便物理网络档位为零（ $D=0$ ），只要在硬件设计之初，合理配置单组基准阻抗 Z_{base} 的品质因数，使其固有的物理电阻 R_{base} 能够覆盖最恶劣频率点下的负阻尼极值：

$$R_{base} > \max_{\omega} |\omega L_{base} \sin(\omega T_d)| \quad (13)$$

该不等式条件在实际工程参数下易于满足。上述频域分析表明：通过引入具备真实有功阻尼的物理基准网络，虚拟补偿层因数字延时而衍生的高频负阻尼特性得到了有效平抑。虚实协同架构不仅实现了阻抗调节域从离散有理集向连续实数域的平滑跨越，更从机理层面拓宽了系统在模拟极低短路比工况下的稳定裕度。

此外，在物理阻抗即将进行离散档位切换的暂态瞬间，通过底层的协同分配机制使虚拟增益 K 发生等幅反向的连续变化，使得虚拟电磁能量能够平滑注入。该机制有效缓冲了硬件拓扑突变所激发的 d/d_t 暂态冲击，从而保障了强弱电网连续演化过程

的平稳过渡，该协同演化时序原理如图4所示。

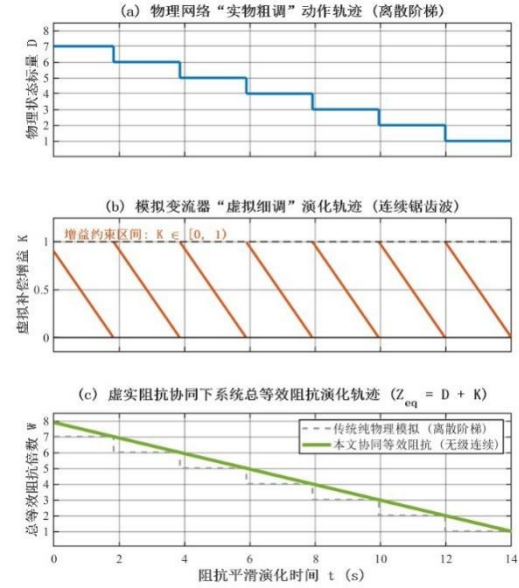


图4 虚实阻抗协同无级平滑演化时序原理图
Fig. 4 Schematic diagram of the time-series evolution of stepless smoothing through coordinated physical-virtual impedance.

1.4 测试系统总体架构设计

基于前述对传统单一阻抗模拟局限性的理论剖析以及虚实协同稳定性的机理推导，本文确立了短路比连续模拟测试系统的总体硬件架构与控制框架。该测试系统的全景拓扑如图5所示。

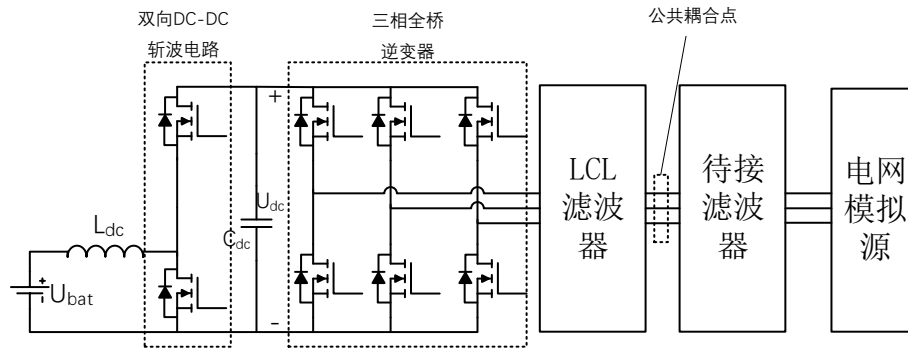


图5 虚实阻抗协同短路比连续模拟测试系统总体架构图
Fig. 5 Overall architecture of the continuous SCR simulation test system based on coordinated physical - virtual impedance.

该系统整体由电网模拟源、物理阻抗网络以及被测构网型储能系统三大功能模块构成。在测试网络的电源侧，部署了基于模型预测控制（MPC）的电网模拟变流器。该变流器作为理想电压源的物

理载体，其数字控制环路不仅负责建立设定的基准电网电压，还需实时采集线路反馈电流，并合成连续的虚拟阻抗压降分量，以此补偿物理网络档位切换时产生的调节级差。

串接于电网模拟源与公共耦合点（PCC）之间的传输链路，由多级级联的离散物理阻抗网络构成。该网络充当系统戴维南等效阻抗的基础约束层，其内部的受控断路器阵列负责接收上位机协同算法下发的离散开关信号，通过动态改变主回路潮流路径，为系统提供必要的真实物理阻尼支撑。

在 PCC 端口的设备侧，接入了待测构网型（GFM）储能系统。该系统的直流端由双向 DC-DC 变换电路维持母线稳压，交流端经 LCL 滤波器并网，作为系统应对短路比动态演化与电网暂态扰动性能评估主体。

上述三大模块通过上位机的软硬件协同解算机制实现全局控制闭环。物理层面的真实阻尼与控制层面的虚拟补偿在该架构下实现了解耦与重构，为下文级联硬件拓扑的具体设计与变流器底层动态跟踪策略的展开提供了系统级框架。

2 虚实阻抗协同的短路比连续模拟平台构建与控制策略

为满足构网型（GFM）变流器在弱电网连续演化过程中的涉网性能测试需求，本章提出一种基于真实阻抗与连续虚拟阻抗协同调控的短路比（SCR）模拟方法。针对传统纯物理模拟的阶跃特性与纯虚拟模拟在高频段的失稳风险，设计了 3-bit 二进制级联物理阻抗网络作为稳态基准，并引入模型预测控制（MPC）策略优化电网模拟变流器的底层控制，以克服滤波电抗引入的动态延迟，进而实现宽范围短路比的连续平稳模拟。

2.1 二进制级联物理阻抗网络拓扑设计

在虚实阻抗协同架构中，物理阻抗网络主要承担两方面作用：一是构成系统戴维南等效阻抗的基础部分，为短路比调节提供真实的稳态潮流约束；二是利用实际电阻、电感元件所具有的物理阻尼特性，削弱虚拟阻抗受数字控制延时影响可能产生的高频负阻尼效应。因此，物理阻抗网络既需要具备足够的阻抗调节范围，又应尽可能减少硬件支路数量及投切次数。基于上述要求，本文采用二进制权重配置方式构建 3-bit 级联物理阻抗网络，以较少的阻抗单元实现较宽范围的离散阻抗调节，并为后续虚拟阻抗连续补偿预留调节空间。本文研究对象为额定线电压 381 V、额定功率 20 kW、额定基波频率 50 Hz 的低压电力电子测试系统。首先，明确线

路阻抗比（X/R）的选型依据：在构网型储能主要接入的中低压配电网及微电网场景中，相较于高压输电网，其线路具有不可忽略的阻性成分。综合考虑极弱电网的感性主导特征与抑制高频谐振所需的物理阻尼，本文选取 X/R=2.0 作为测试场景的基准设计参数。

在此基础上，根据系统额定电压和额定功率，首先计算测试系统的基准等效阻抗 Z_N ：

$$Z_N = \frac{V_N^2}{P_N} = \frac{381^2}{20000} \approx 7.258 \Omega \quad (14)$$

根据本文后续的协同解算逻辑，强电网基准短路比 SCR=8.0 对应系统的单组物理基准阻抗幅值 $|Z_{base}|$ ，其计算如下：

$$|Z_{base}| = \frac{Z_N}{SCR_{base}} = \frac{7.258}{8.0} \approx 0.907 \Omega \quad (15)$$

结合设定的线路阻抗比 $X_{base}/R_{base}=2.0$ ，基准阻抗幅值可表示为：

$$|Z_{base}| = \sqrt{R_{base}^2 + X_{base}^2} = \sqrt{R_{base}^2 + (2R_{base})^2} = \sqrt{5} R_{base} \quad (16)$$

由此可联立求解出单组物理基准电阻 R_{base} 与基准感抗 X_{base} ：

$$R_{base} = \frac{|Z_{base}|}{\sqrt{5}} = \frac{0.907}{\sqrt{5}} \approx 0.4057 \Omega \quad (17)$$

$$X_{base} = 2 \times R_{base} \approx 0.8114 \Omega \quad (18)$$

进一步，根据额定基波频率推导出单组物理基准电感 L_{base} 的实际参数：

$$L_{base} = \frac{X_{base}}{2\pi f} = \frac{0.8114}{2\pi \times 50} \approx 2.583 \text{ mH} \quad (19)$$

完成单组基准阻抗参数设计后，为在有限硬件数量下扩展物理阻抗的调节范围，本文将三组阻抗单元按照 1:2:4 的二进制权重进行配置，即各支路阻抗分别设置为 Z_{base} 、 $2Z_{base}$ 和 $4Z_{base}$ 。三组阻抗单元依次串联于主回路中，每组阻抗单元两端并联一个受控三相交流断路器，通过改变断路器状态实现对应阻抗单元的投入或旁路，其具体拓扑结构如图 6 所示。

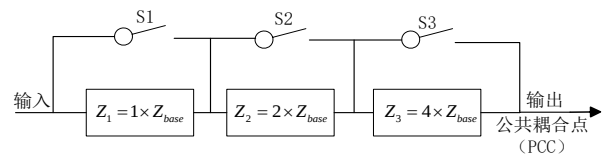


图 6 基于二进制权重分配的 3-bit 级联物理阻抗网络拓扑
Fig. 6 Topology of a 3-bit cascaded physical impedance network based on binary weight allocation.

结合图 6 所示的拓扑结构，定义各组断路器的硬件驱动状态变量为 $S_i \in \{0, 1\}$, ($i=1,2,3$)。当 $S_i=1$ 时，断路器闭合，主回路电流从断路器支路流过，对应的阻抗单元 Z 被旁路短接；当 $S_i=0$ 时，断路器断开，主回路电流强制流经该阻抗单元。据此，可定义物理网络的阻抗投入状态字 $b_i=1-S_i$ 。该 3-bit 级联系统的总等效物理阻抗 Z_{phy} 的数学模型可表示为：

$$Z_{phy} = \sum_{i=1}^3 b_i \cdot 2^{i-1} \cdot Z_{base} = \sum_{i=1}^3 (1-S_i) \cdot 2^{i-1} \cdot Z_{base} \quad (14)$$

通过 3 个受控开关状态的排列组合，可形成 $D \in \{0,1,\dots,7\}$ 共 8 种物理阻抗档位，对应总物理阻抗由 $0 \cdot Z_{base}$ 至 $7 \cdot Z_{base}$ 逐级变化。采用二进制权重配置后，仅需三组物理阻抗单元即可获得 8 档离散调节能力，在减少硬件数量的同时扩展了物理阻抗覆盖范围。由此，物理网络主要承担系统总阻抗中的整数档位部分，而相邻物理档位之间的连续阻抗差值则由后续虚拟阻抗层进行补偿，为“实物粗调+虚拟细调”的协同调节策略奠定硬件基础。

2.2 基于模型预测控制的虚拟阻抗动态跟踪策略

在利用电网模拟变流器生成连续虚拟阻抗、补偿相邻物理阻抗档位之间调节级差的过程中，关键在于使并网点电压 V_{pcc} 能够快速、准确地跟踪叠加虚拟阻抗压降后的参考指令 V_{ref}^* 。尤其在短路比连续变化或物理阻抗档位切换时，虚拟阻抗指令会随线路电流和目标阻抗实时变化，因此电网模拟变流器的动态跟踪性能将直接影响等效阻抗重构的准确性及切换过程的平滑程度。传统电压外环—电流内环双闭环 PI 控制虽然能够满足一般稳态电压调节需求，但受级联控制结构及交流侧 LC 滤波环节的共有限制，其快速跟踪动态虚拟阻抗指令的能力相对有限。

在传统双闭环控制结构中，电压外环根据端电压误差生成内环电流参考值，电流内环进一步调节逆变器输出电压，再经 LC 滤波环节作用于并网点电压。因此，端电压指令的变化需要依次经过电压环、电流环以及滤波器动态过程，其整体响应速度受到电流内环带宽和 LC 滤波器固有动态特性的共同约束。与此同时，数字控制系统中的 A/D 采样、控制运算以及 PWM 调制均会引入不可避免的控制延时。考虑一个控制周期 T_s 的计算延时以及约 $0.5T_s$ 的 PWM 等效调制延时，数字控制回路可近似

为总计 $1.5T_s$ 的纯滞后环节 $e^{-1.5sT_s}$ 。

当并网点发生电压、电流暂态变化，或虚拟阻抗指令快速调整时，电压外环首先需要根据电压偏差重新生成电流参考值，随后由电流内环完成跟踪并通过 PWM 调制作用于逆变器输出。该级联调节过程不仅受到 PI 控制器动态特性的限制，还与数字控制延时及 LC 滤波器的物理惯性相互叠加，使端电压对快速变化参考指令的跟踪产生额外相位滞后。为保证闭环稳定性，传统设计通常需要限制电压环控制带宽，这又进一步降低了系统对暂态虚拟阻抗压降指令的响应速度。当物理阻抗发生档位切换或目标短路比快速变化时，上述动态滞后容易造成实际端口阻抗与目标阻抗之间的短时偏差，从而影响短路比连续模拟的暂态逼真度。

为克服上述动态延迟，本文在电网模拟变流器的底层控制中引入连续集模型预测控制 (Continuous-Control-Set MPC, CCS-MPC)。该方法利用物理电路的精确离散数学模型，通过预测系统未来状态并极小化代价函数，直接求解出最优调制电压，从而消除 PI 积分环节的延时，电网模拟变流器交流侧 LC 滤波环节单相等效电路如图 7 所示。

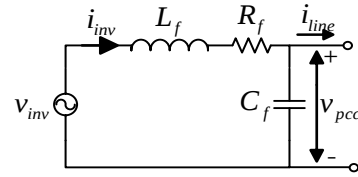


图 7 电网模拟变流器交流侧 LC 滤波环节单相等效电路
Fig. 7 Single-phase equivalent circuit of the AC-side LC filter stage of the grid-simulator converter.

建立电网模拟变流器交流侧 LC 滤波环节的连续时间状态空间方程：

$$\frac{dv_{pcc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} [i_{inv}(t) - i_{line}(t)] \quad (15)$$

$$\frac{di_{inv}(t)}{dt} = \frac{1}{L_f} [v_{inv}(t) - v_{pcc}(t) - R_f i_{inv}(t)] \quad (16)$$

式中， v_{inv} 为逆变桥桥臂中点输出电压； v_{pcc} 为滤波电容端电压（即并网点电压）； i_{inv} 为变流器侧电感电流； i_{line} 为流向被测设备的线路电流； L_f 、 C_f 、 R_f 分别为滤波电感、电容及其寄生电阻。

基于控制周期 T_s 采用前向欧拉法 (Forward Euler) 进行离散化，得到系统的单步预测模型：

$$v_{pcc}(k+1) = v_{pcc}(k) + \frac{T_s}{C_f} [i_{inv}(k) - i_{line}(k)] \quad (17)$$

$$i_{inv}(k+1) = \left(1 - \frac{R_f T_s}{L_f}\right) i_{inv}(k) + \frac{T_s}{L_f} [v_{inv}(k) - v_{pcc}(k)] \quad (18)$$

为实现虚拟阻抗调控下的端电压精准跟踪, 定义目标指令为 v_{ref}^* 。构建考虑一步延时补偿的二次型代价函数 (Cost Function) J :

$$J = \|v_{ref}^*(k+2) - v_{pcc}(k+2)\|^2 \quad (19)$$

为使代价函数最小化 (理想情况下 $J \rightarrow 0$), 令预测的端电压等于参考电压。根据离散预测模型联立推导, 可反解出在 k 时刻必须施加的最优目标电流指令 $i_{inv}^*(k+1)$:

$$i_{inv}^*(k+1) = i_{line}(k+1) + \frac{C_f}{T_s} [v_{ref}^*(k+2) - v_{pcc}(k+1)] \quad (20)$$

进一步将目标电流代入电流预测模型中, 计算出空间矢量调制器 (SVPWM) 所需的最优逆变器输出电压矢量 $v_{inv}^*(k+1)$:

$$v_{inv}^*(k+1) = v_{pcc}(k+1) + R_f i_{inv}^*(k+1) + \frac{L_f}{T_s} [i_{inv}^*(k+1) - i_{inv}(k)] \quad (21)$$

该最优预测电压指令直接跨越了传统 PI 的误差累计过程, 利用前馈预测机制提前补偿了 L_f 与 C_f 的物理惯性。通过引入该 CCS-MPC 策略, 电网模拟变流器能提升了变流器对虚拟阻抗压降指令的动态跟踪性能, 有效解决了大滤波电抗带来的动态响应迟滞问题, 为后续的虚实阻抗无缝拼接与协同切换奠定了高频段响应基础。

2.3 物理-虚拟阻抗协同解算与分配算法

为使上述物理硬件拓扑与虚拟阻抗补偿层能够根据上位机下发的连续短路比 (SCR) 指令进行自动化协同动作, 需在系统底层控制中设计一套高时效性的软硬件协同解算算法。该算法的执行周期与变流器底层离散控制步长 (如 $100\mu s$) 严格同步, 以确保在接收到斜坡或阶跃短路比指令时, 系统能够进行快速、平滑的阻抗重构。

根据电力系统短路容量的定义, 系统总戴维南等效阻抗幅值与短路比呈严格的反比例关系。设强电网基准短路比为 8.0 (对应系统的单组基准物理阻抗 Z_{base}), 首先计算达到目标短路比 SCR_{target} 所需的等效阻抗总倍数 W :

$$W = \frac{8.0}{SCR_{target}} \quad (22)$$

为确保底层电气拓扑运行在安全的物理约束范

围内, 算法输入端设置了限幅保护环节, 强制限定目标指令 $SCR_{target} \in [1.0, 8.0]$ 。随后, 对解算得到的总阻抗倍数 W 进行向下取整 (Floor) 操作, 将其分解为用于控制离散物理网络的整数部分 D 与用于控制模拟变流器虚拟增益的小数部分 K 。

在常规跌落工况下, D 的取值范围为 $\{0, 1, \dots, 6\}$, K 的取值范围为半开区间 $[0, 1)$ 。然而, 当测试系统运行至极弱电网边界工况 (即 $SCR_{target}=1.0$) 时, 计算得出 $W=8.0$ 。由于 3-bit 物理阻抗网络的最大合成状态标量为 7, 此时需引入边界极值处理逻辑: 强制锁定物理阻抗最高档位 $D=7$, 并将剩余的 1 倍阻抗需求全部分配给模拟变流器的连续增益项, 即设定 $K=1.0$ 。这一限幅与边界处理机制从根本上避免了控制变量的溢出错误。

获得物理网络的整数倍数 D 后, 需将其转化为控制 3 组级联阻抗单元的具体状态位。利用十进制转二进制 (D2B) 的位操作 (Bitwise Operation) 运算, 将整数 D 解析为 3 位二进制序列, 分别对应 3 组物理阻抗的投入需求标志位 b_1, b_2, b_3 :

$$\begin{aligned} b_1 &= \text{bitget}(D, 1) \\ b_2 &= \text{bitget}(D, 2) \\ b_3 &= \text{bitget}(D, 3) \end{aligned} \quad (23)$$

在硬件电气连接中, 受控断路器与物理阻抗单元呈并联关系。当系统需要某一组阻抗接入线路时 (即需求位 $b_i=1$), 对应的断路器必须处于断开状态以迫使主回路电流流经该阻抗; 反之, 若不需要该组阻抗 ($b_i=0$), 断路器必须闭合将其旁路短接。因此, 最终输出至物理硬件断路器的驱动指令 S_i 必须进行逻辑取反:

$$S_i = \bar{b}_i = 1 - b_i \quad (24)$$

上述短路比协同解算与软硬件信号分配的完整控制逻辑如图 8 所示。

通过上述解算流程, 宏观的任意连续短路比指令被实时、精确地解构为 3 路高低电平机械开关信号与 1 个连续浮点虚拟增益变量。在电网强度连续劣化的演化过程中, 物理断路器随着指令的下降呈二进制规律逐级动作, 而虚拟阻抗参数 K 则呈现周期性的锯齿波 (Sawtooth) 形态, 有效补偿了物理拓扑切换前后的阻抗级差, 最终实现了等效短路比在测试环境中的无级平滑调节。

2.4 协同架构下的系统戴维南等效建模

在完成了 3-bit 级联物理网络搭建、模型预测

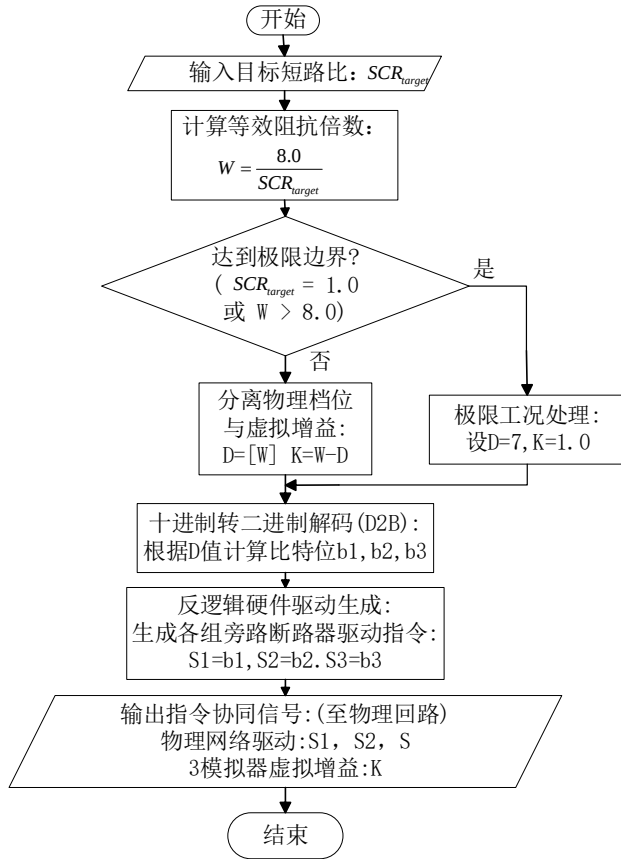


图 8 短路比协同解算与软硬件信号分配逻辑流程图

Fig. 8 Flowchart of coordinated SCR calculation and hardware-software signal allocation logic.

(MPC) 底层控制优化以及软硬件协同解算算法设计后, 可对本测试平台进行端口外特性的宏观等效建模。

对于被测的构网型 (GFM) 变流器而言, 其并网节点 (PCC) 向外部测试网络看进去的整体阻抗特性, 可利用戴维南定理 (Thevenin's Theorem) 进行化简综合。结合 2.1 节的物理阻抗模型与 2.2 节模拟变流器基于 MPC 实现的无延时虚拟阻抗压降, 系统在复频域 s 下的总戴维南等效阻抗 $Z_{eq}(s)$ 为:

$$Z_{eq}(s) = Z_{phy}(s) + Z_{vir}(s) \quad (25)$$

$$Z_{eq}(s) = \left(\sum_{i=1}^3 b_i \cdot 2^{i-1} \right) Z_{base}(s) + K \cdot Z_{base}(s) \quad (26)$$

将 2.3 节协同解算算法中的数学关系 $D = \sum_{i=1}^3 b_i \cdot 2^{i-1}$ 代入上式, 并提取公因式 $Z_{base}(s)$, 可得:

$$Z_{eq}(s) = (D + K) Z_{base}(s) = W \cdot Z_{base}(s) \quad (27)$$

进一步代入宏观短路比指令关系 $W = 8.0 / SCR_{target}$, 最终系统的全频域戴维南等效方程化

简为:

$$Z_{eq}(s) = \left(\frac{8.0}{SCR_{target}} \right) (R_{base} + sL_{base}) \quad (28)$$

该综合等效模型从理论层面验证了所提协同模拟架构的可行性与优势。一方面, 系统的总等效阻抗 $Z_{eq}(s)$ 克服了传统物理网络离散档位的局限, 成功实现了宏观短路比指令向连续实数域的平滑映射, 确保了阻抗调节的连续性。另一方面, 得益于底层连续集模型预测控制策略 (MPC) 的应用, 系统有效削弱了传统 PI 控制器因数字延时引发的相位偏移。在主要工作频段内, $Z_{eq}(s)$ 能够保持与真实物理阻抗网络高度一致的宽频响应特征, 显著抑制了虚拟控制在高频段易诱发的负阻尼效应。

综上所述, 本文构建的虚实阻抗协同测试平台在公共耦合点 (PCC) 处可等效为一个空载电动势恒定、内部戴维南阻抗无级连续缩放的理想电网源模型。该模型既保留了物理阻抗网络在应对暂态扰动时的硬件阻尼支撑优势, 又兼具数字虚拟控制的高分辨率调节特性, 从而为构网型变流器在极弱电网条件下的暂态交互机理分析与自适应控制验证提供了高保真的测试边界条件。

3 虚实协同连续模拟平台多工况仿真验证

为验证本文所提虚实阻抗协同连续模拟方法的有效性, 本章在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了全电磁暂态仿真测试平台。该平台以额定功率为 20 kW 的构网型储能变流器作为被测对象, 电网模拟源底层采用连续集模型预测控制 (MPC)。为全面评估模拟平台的外特性表现, 本章分别设计了短路比 (SCR) 连续平滑演化、SCR 阶跃突变, 以及电网频率与电压扰动等多种典型测试工况, 并与传统固定物理阻抗法、纯虚拟阻抗法进行了多维度的对比分析。

为开展多工况仿真测试, 本文构建了包含电网模拟源与构网型 (GFM) 变流器的全电磁暂态模型。系统主电路与控制参数依据微电网典型工程标准标定, 具体如表 1 所示。

3.1 短路比连续平滑演化稳态特性分析

设定系统在 $t=0-2.0s$ 阶段运行于强电网环境 ($SCR = 8.0$); $t=2.0s$ 起, 短路比以 $-0.5 s^{-1}$ 的斜率进行线性衰减, 至 $t=16.0s$ 降至弱电网环境

表1 电网模拟源与构网型 (GFM) 变流器主电路控制参数

Table 1 Main Circuit and Control Parameters of the Grid Simulator and Grid-Forming (GFM) Converter		
参数类别	参数名称及符号	数值与单位
交流侧基准参数	额定线电压 V_{nom}	381 V
	额定基波频率 f_n	50 Hz
	逆变器额定有功功率 P_n	20 kW
直流侧储能参数	电池模块标称容量 C_{bat}	400 Ah(240kWh)
	电池模块标称电压 V_{dc}	600 V
	稳压母线目标电压 V_{dc}^*	800 V
构网型变流器控制参数	虚拟转动惯量 J	0.5 kg·m ²
	频率下垂阻尼系数 D_p	4000
	无功调压下垂系数 D_q	0.005 V/var
测试线路及环境参数	线路基准阻抗比 X/R	2.0
	单组物理基准电阻 R_{base}	0.4057 Ω
	单组物理基准电感 L_{base}	2.583 mH
	短路比测试指令范围 SCR	[1.0, 8.0]

(SCR = 1.0), 两种模拟方法的外特性演化轨迹如图9所示。

由图9可见, 传统固定物理阻抗法受硬件离散拓扑限制, 在 2.0-16.0s 内经历了 7 次阶跃跳变, 无法真实反映大电网阻抗的连续缓变特性。相比之下, 本文虚实协同法通过“实物粗调+虚拟细调”策略, 在物理档位切换瞬间注入连续虚拟压降补偿级差, 实现了 SCR 从 8.0 至 1.0 的整体平滑演化。

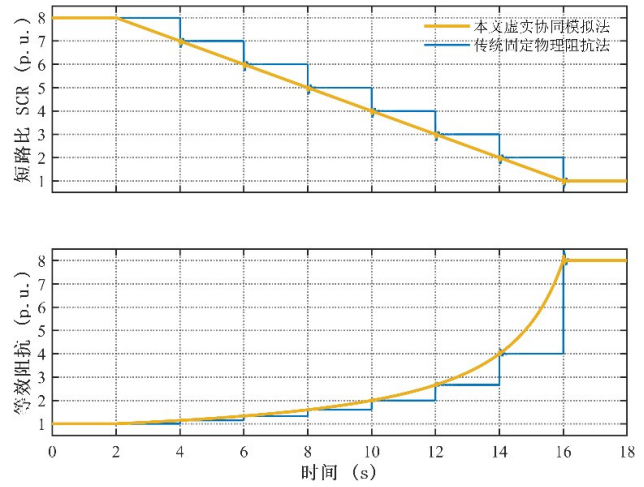


图9 短路比连续平滑演化及等效阻抗对比波形图
Fig. 9 Waveform comparison of continuous smooth evolution of the short-circuit ratio and equivalent impedance.

值得注意的是, 受限于数字控制系统的固有计算延时, 在物理硬件动作瞬间会产生暂态失配毛刺; 但得益于底层 MPC 算法的高频跟踪带宽, 该暂态偏差被快速平抑, 有效规避了传统纯硬件投切引发的长时低频振荡与电磁冲击。

3.2 电网短路比突变工况暂态响应分析

设定系统于 $t=2.0s$ 时发生 SCR 阶跃突变 (由强电网突变至极弱电网边界), 图10对比了两种方

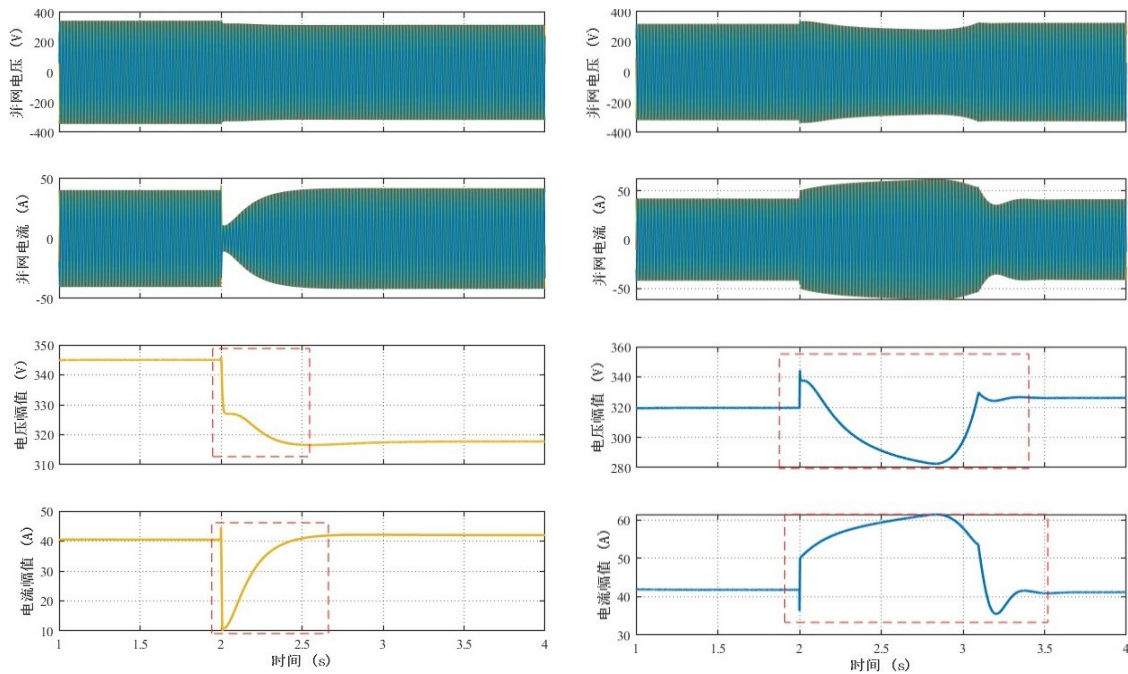


图10 电网短路比突变工况暂态响应对比波形图

Fig. 10 Comparison of transient response waveforms under a step change in the grid short-circuit ratio.

法的PCC电压与电流暂态响应。

如图10右侧波形所示，纯虚拟阻抗法在突变瞬间因控制延时与虚拟感抗叠加，系统暂态阻尼减弱。其电流有效值过冲至约60 A，PCC电压一度跌落至280 V附近，并伴随长达1.2 s的低频振荡，动态响应明显迟滞。

相比之下，如图10左侧波形所示，本文协同法在突变瞬间由物理网络承担主要感抗变化，利用电抗器的真实电磁能量缓冲提供了瞬态正阻尼。并网电流仅短暂下探至约10A，随后在0.5s内平滑收敛至标称值（约42 A），全过程无过冲尖峰与低频振荡；PCC电压亦平稳过渡至320V的新稳态。对比表明，物理基准层的引入有效分担了瞬态解算压力，显著提升了极端工况下的暂态鲁棒性。

3.3 典型电网扰动下平台暂态支撑性能验证

为评估所提虚实协同连续模拟法在电网扰动工况下的暂态适应性，本节开展了频率阶跃与电压跌落实验，并对比了传统固定物理阻抗法、纯虚拟阻抗法与本文所提方法的特性响应。

3.3.1 电网频率阶跃扰动响应

本实验设定 $t=2.0\text{s}$ 时基准频率发生 $+0.5\text{Hz}$ 阶跃，分别考察测试平台在极弱（ $\text{SCR}=1.2$ 、 1.5 ）与弱电网（ $\text{SCR}=2.0$ ）下的暂态响应。

在极弱电网（ $\text{SCR}=1.2$ ）下，系统暂态波形如图11所示：

由于极大感抗与控制延时叠加，纯虚拟法在频率突变时产生相角偏移与电压矢量失配。其有功功率由稳态的20 kW跌落至约3 kW，无功功率暂态极差达5500 var，并伴随约0.6s的低频振荡。相比之下，本文协同法利用底层物理网络的电磁惯性有效缓冲了相角冲击，无功功率无明显过冲，有功功率平滑收敛至约7.5kW的理论预期值。

随着电网强度提升至 $\text{SCR}=1.5$ 与 $\text{SCR}=2.0$ ，系统暂态波形分别如图12和图13所示：

如图所示，尽管纯虚拟法的功率波动幅度随SCR增大而逐渐减小，但控制迟滞特征依然存在。本文协同法则在各类工况下均保持了与纯物理法高度一致的平稳暂态轨迹。综合表明，虚实协同架构通过引入物理阻尼约束，显著降低了纯数字解算在频率扰动下的失稳风险，提供了更为稳定的测试边界。

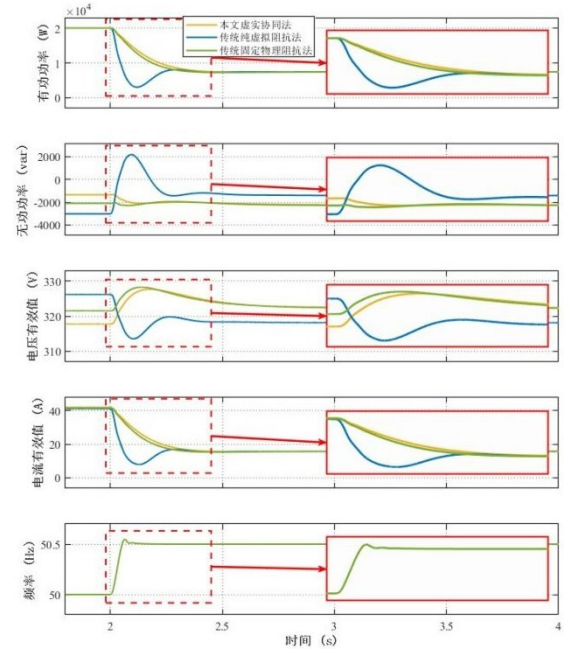


图11 SCR=1.2下频率阶跃暂态响应对比波形图
Fig. 11 Comparison of frequency-step transient response waveforms at SCR=1.2.

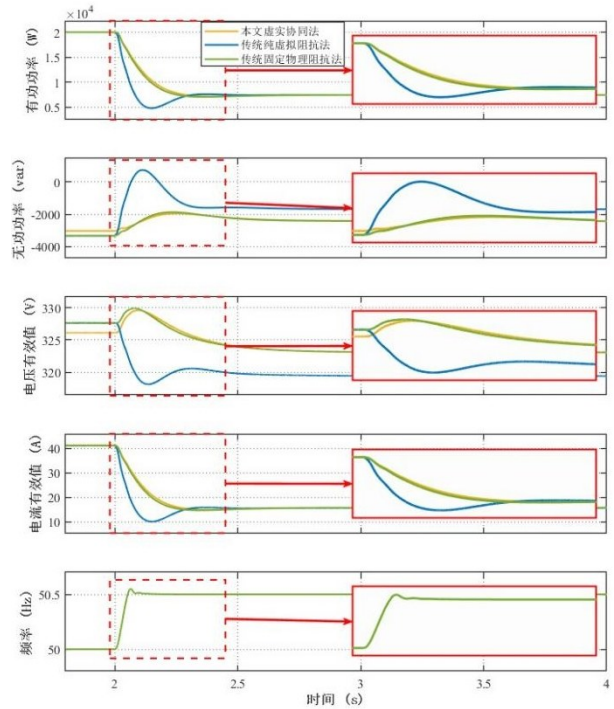


图12 SCR=1.5下频率阶跃暂态响应对比波形图
Fig. 12 Comparison of frequency-step transient response waveforms at SCR=1.5.

3.3.2 电网电压跌落工况响应分析

本实验模拟电网电压有效值阶跃跌落工况，考察平台在 $\text{SCR}=1.2$ 、 $\text{SCR}=2$ 和 $\text{SCR}=6$ 三种电网强

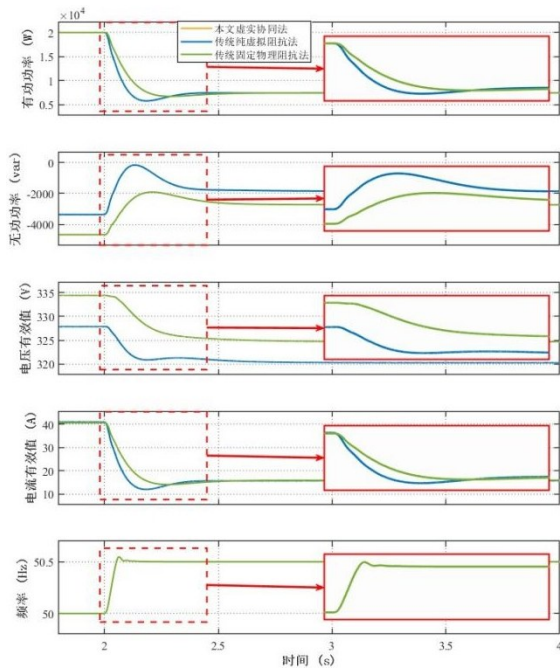


图 13 SCR=2.0 下频率阶跃暂态响应对比波形图
Fig. 13 Comparison of frequency-step transient response waveforms at SCR=2.0

度下的暂态限流性能。

在 SCR=1.2 下，系统暂态波形如图 14 所示：此时系统所需模拟的等效感抗极大。由于控制

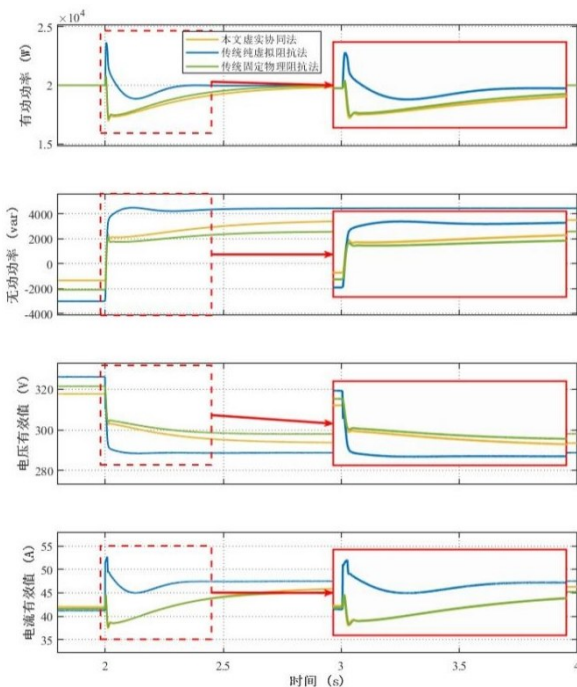


图 14 SCR=1.2 下电压跌落暂态响应对比波形图
Fig. 14 Comparison of voltage-sag transient response waveforms at SCR=1.2.

延时，纯虚拟法未能及时生成等效压降，无功功率跃变可达 4000var，暂态恢复时间超过 0.6s。而本文协同法凭借底层物理电抗器的电磁惯性限制了瞬态冲击，有功功率迅速恢复。

在 SCR=2 下，系统暂态波形如图 15 所示：

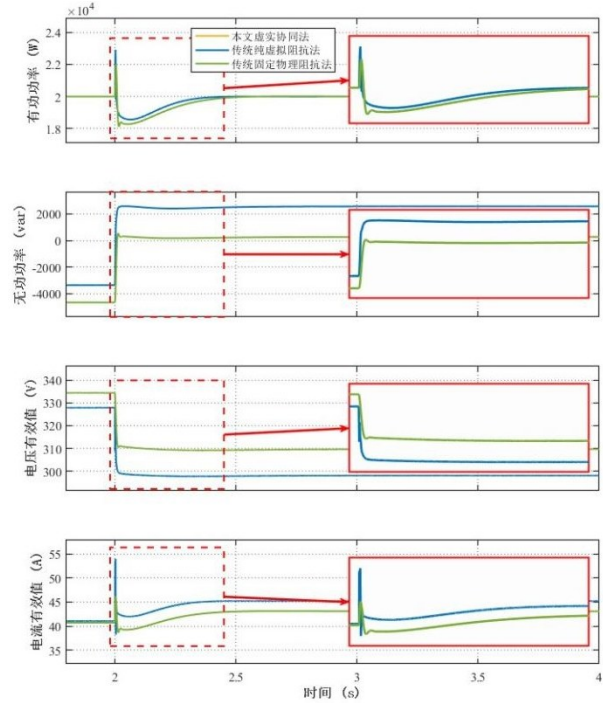


图 15 SCR=2 下电压跌落暂态响应对比波形图
Fig. 15 Comparison of voltage-sag transient response waveforms at SCR=2

纯虚拟法的电流过冲峰值达 54A，且存在长达 0.4s 的低频波动。本文协同法由于物理网络分担了感抗解算负担，电流峰值被限制在约 46A（较纯虚拟法降低约 14.8%），交直流功率过渡更为平稳，外特性逼近纯物理法。

在 SCR=6 下，系统暂态波形如图 16 所示。

尽管整体阻抗较小，纯虚拟法的并网电流峰值仍达到约 58A，无功跳变约 4500var。本文协同法同样依托物理层面的 di/dt 约束，将电流峰值降低至约 52A。综合表明，本文协同架构在各种电网强度下均能有效分担暂态冲击，弥补纯虚拟法暂态限流能力不足的缺陷，提供物理约束更为真实的阻抗边界。

4 结 论

本文围绕构网型储能系统在弱电网条件下的涉

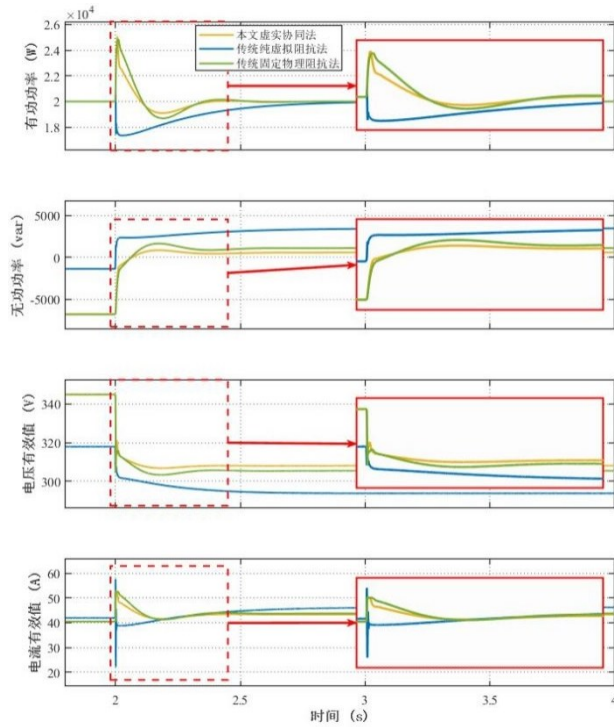


图 16 SCR=6 下电压跌落暂态响应对比波形图
Fig. 16 Comparison of voltage-sag transient response waveforms at SCR=6

网性能测试需求，研究了短路比（SCR）的连续模拟方法。针对物理阻抗模拟调节离散，以及纯虚拟阻抗模拟在高感抗条件下受控制延时影响易引发系统失稳的问题，提出一种基于物理与虚拟阻抗协同调控的短路比连续模拟方法，并通过全电磁暂态仿真开展了多工况验证。

构建的“实物粗调+虚拟细调”协同模拟架构，通过 3-bit 级联离散物理阻抗网络提供稳态物理阻尼支撑，结合电网模拟变流器输出的连续虚拟阻抗压降进行级差补偿，平抑了机械开关投切带来的暂态冲击，实现了 SCR 在 8.0 至 1.0 范围内的平滑演化。同时，在变流器底层引入连续集模型预测控制（CCS-MPC）策略，通过最小化代价函数直接求解最优调制电压指令，减小了传统 PI 控制的积分滞后。该策略提升了系统对暂态虚拟指令的高频跟踪带宽，抑制了极弱电网大感抗模拟时的闭环高频负阻尼现象。

仿真结果表明，在短路比突变、频率阶跃及电压跌落等电网扰动工况下，物理基准层分担了系统的瞬态解算压力与冲击。以 SCR=2 的电压跌落工况为例，协同架构将短路冲击电流峰值限制在

46A，较纯虚拟阻抗法降低约 14.8%；在 SCR=1.2 的频率阶跃工况下，平抑了纯虚拟法中达 5500var 的无功功率暂态波动。所提方法削弱了并网点电流过冲与低频功率振荡，提供了具有物理约束的暂态测试环境。

综上所述，该方法兼顾了物理器件的固有稳定性与数字控制的分辨率，为构网型装备的自适应控制策略验证提供了一种可行的测试方案。

参考文献

- [1] Lee S H, Choi D, Baek S M. Complex Short Circuit Ratio to Evaluate Grid Robustness for Inverter Integration[J]. IEEE Access, 2025.
- [2] Wang Y, Xiang W, Zhang H, et al. Optimal allocation of grid-forming and grid-following WTGs for stable weak grid integration [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025.
- [3] Salem Q, Fawaz B B, Aljarrah R, et al. Grid Forming Converters for Low Inertia Systems– Capabilities and Limitations: A Critical Review[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2025.
- [4] Pei X, Xu W, Jia C, et al. A grid-forming control method of the PMSG-based wind turbine suitable for wide-range short-circuit ratio[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2026.
- [5] Radwan A, Elshenawy M A, Mohamed Y A R I, et al. Grid-forming voltage-source inverter for hybrid wind-solar systems interfacing weak grids[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2024, 5: 956-975.
- [6] Askarian A, Park J, Salapaka S. Enhanced grid-following (E-GFL) inverter: A unified control framework for stiff and weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 5089-5107.
- [7] Mohammed N, Udawatte H, Zhou W, et al. Grid-forming inverters: A comparative study of different control strategies in frequency and time domains[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 185-214.
- [8] Hans F, Borowski P, Wendt J, et al. Opportunities and challenges of advanced testing approaches for multi-megawatt wind turbines [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2024, 5: 323-335.
- [9] Ullah M, Guan Y, Yu Y, et al. Dynamic Performance and Power Quality of Large-Scale Wind Power Plants: A Review on Challenges, Evolving Grid Code, and Proposed Solutions[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2025.
- [10] Shi Q, Dong W, Wang G, et al. Grid strength assessment method for evaluating small-signal synchronization stability of grid-following and grid-forming converters integrated systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2025, 13 (1): 55-65.
- [11] Rimorov D, Forbes J R, Tremblay O, et al. Robust impedance emulation for transmission line interface in power-hardware-in-the-loop applications: optimal filter approach[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2025, 6: 158-169.

- [12] Liu D, De Din E, Carta D, et al. Controller Hardware-in-the-Loop Testing of a Multi-Timescale Control Architecture for Multi-Energy Systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2025.
- [13] Jalilian M J, Vahidi B, Zarei S F, et al. Active Damping Control of High-Frequency Resonances Based on Virtual Admittance for DFIG System Connected to Weak Grid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024.
- [14] Lin H, Ge P, Xu H, et al. Resonance Characterization and Frequency-Divided Compensation Strategy for Heterogeneous Inverters-Paralleled System[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 13(1): 42-54.
- [15] Fernandez J D, Eloy-Garcia J, Navarro E R, et al. Low-voltage ride-through algorithm for grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 40(1): 303-315.
- [16] Liu W, Bongiorno M, Narula A, et al. Grid impedance estimation during large SCR drop events with grid-forming converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2026.
- [17] Almesri Z M, Hussain H A, Kamel R M. Low voltage ride-through capability of grid-connected PV systems: a comparative study of grid-following and grid-forming converters under current limits[J]. IEEE Access, 2025, 13: 105590-105607.
- [18] Souza M E T, Henrique T D M, Rodrigues D B, et al. Unified Control Strategy for Islanded, Seamless Transition, and Grid-Connected Operations of Inverter-Based Distributed Generation and Microgrids[J]. IEEE Access, 2025, 13: 202253-202274.
- [19] Fernández J D, Navarro E R, Amenedo J L R, et al. Operation of a Grid-Forming Converter Controlled by the Flux Vector[J]. IEEE Access, 2025, 13: 7040-7052.
- [20] Bayindir A B, Sharida A, Bayhan S, et al. Enhanced inverse model predictive control for ev chargers: Solution for dc – dc side [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2025, 6: 478-490.