

直流组网逆变器并联系统虚拟阻抗自适应设计

付文秀, 吴国栋, 胡 斌

(上海船舶设备研究所, 上海 200031)

摘 要: [目的]针对新能源船舶逆变器并联系统中因参数差异与线路阻抗不均导致的无功环流及功率分配不均问题, [方法]提出一种基于虚拟阻抗的自适应控制方法。该方法通过对逆变器的输出功率的实时监测, 并对虚拟阻抗的大小进行动态自适应调节, 从而有效应对电路参数差异, 提升功率均分精度。详细阐述该控制方法的核心算法和控制系统组成, 并建立不同容量条件下的并网仿真模型。[结果]仿真结果验证所提方案在抑制环流、改善功率动态响应及提升电能质量方面的优越性, 提升系统鲁棒性。[结论]研究成果为新能源船舶逆变器并联系统的环流抑制与功率均衡提供一种高效的解决方案。

关键词: 直流组网; 逆变器并联; 船舶电站; 虚拟阻抗; 自适应控制; 功率均分

中图分类号: U665.12 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.06.12

Adaptive Design on Virtual Impedance for DC Networked Inverters in Parallel System

FU Wenxiu, WU Guodong, HU Bin

(Shanghai Marine Equipment Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: [Purpose] An adaptive control method on virtual impedance is introduced, in order to solve circulating currents problems and asymmetric power distribution during parallel operation of inverters in DC networks caused by parameter differences and unequal lines impedances. [Method] It also suppresses circulating current and enhances power sharing accurately through the dynamic adjustment of the virtual impedance value by monitoring the real time output of inverters. Principle of the virtual impedance adaptive algorithm and the realization architecture of the control strategy are explained. In addition, the simulated models is constructed. The superior performance of the proposed scheme to suppress circulating current, improve dynamic response and enhance the stability of the whole system is verified by comparison among different cases. [Result] Finally, the method can adaptively adjust control parameters according to the parameters of the circuit and changes in the external disturbances to improve robustness. [Conclusion] An efficient solution for circulating current suppression and power balancing in parallel inverter systems of new energy ships is provided.

Key words: DC networking; inverter parallel operation; ship power station; virtual impedance; adaptive control; power distribution

0 引言

随着新能源船舶电力系统的快速发展, 多台逆变器在公共直流母线上并联运行的组网模式日益普遍。系统面临的核心挑战在于各逆变单元之间的环流问题。环流主要由逆变器本体参数(如滤波电感、

电容容差)、输出连接线路阻抗差异以及控制器参数不一致等因素引起。环流不仅会导致额外功率损耗和设备温升, 降低系统效率与使用寿命, 还会造成输出电压波形畸变, 威胁系统稳定运行。当新能源通过逆变电源与柴发机组并网, 或2组逆变电源并

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-11-29

作者简介: 付文秀(1989—), 女, 高级工程师。研究方向: 船舶电力系统及智能化。

网为交流电站日用负荷供电时, 微小的电压变化便会导致明显的功率分配不均, 单纯依赖下垂系数调节难以实现合理的负荷分配^[1-4]。

传统解决方案大多采用硬件筛选或高精度元器件, 成本较高且缺乏灵活性。文献[5-6]提出的下垂控制系数能改善功率分配偏差, 但较大的下垂系数调节会使逆变器输出电压与电网端电压差距过大, 无效的电压调节会引发较大波动, 难以在宽工况范围内兼顾功率均分, 甚至在某些情况下影响电网稳定运行^[7-8]。TULADHAR等^[9]提出采用谐波抑制方式改善逆变电源的功率分配, 但该方法会造成系统谐波污染, 甚至引发系统谐振问题。CHEN等^[10]提出基于控制策略的软件方法, 即引入虚拟阻抗, 因无须增加附加硬件, 可实现便捷的改进, 成为新的研究方向。虚拟阻抗是在逆变器控制回路中加入可调性质的阻抗环节, 使等效阻抗增大或改善阻抗分布, 起到阻抗变换的作用。然而, 若将虚拟阻抗参数设为固定值, 则难以适应负载变化和工况变化, 在特定工况下易出现环流抑制效果不佳, 甚至破坏系统整体稳定性。

本文针对直流组网逆变器并联系统, 重点开展虚拟阻抗自适应设计研究, 提出一种能根据系统实际运行情况(主要为输出功率)实时调节虚拟阻抗值的算法, 并在此基础上构建了自适应控制策略。仿真结果表明, 采用自适应虚拟阻抗能更稳定可靠地抑制环流, 并在不同负载条件下实现功率均分。

1 环流形成机理分析

在新能源船舶直流组网、交流并联输出的系统中, 环流是指流经各并联逆变器单元之间、不经过公共负载的无效电流, 见图1中箭头曲线。设逆变器1和逆变器2的输出电压分别为 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$, M 为配电板电操马达, R_1 为逆变器1支路等效电阻, R_2 为逆变器2支路等效电阻, X_1 为逆变器1支路等效电抗, X_2 为逆变器2支路等效电抗, j 为复函数的虚数单位, MSB(Main Switch Board)为配电板简称, 公共母线电压为 $\dot{U}$ 。2个日用逆变器支路阻抗的差异将导致输出无功环流, 其根本成因在于并联点(交流母线)输出电压与各逆变器输出端电压之间存在幅值差和相位差。

建立逆变器并联系统的等效电路模型, 新能源船舶直流组网、交流并联输出的系统一般由2台日用供电逆变器并联运行。输出阻抗(含线路阻抗)分别为

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + jX_1 \\ Z_2 = R_2 + jX_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, KVL), 对各支路列写方程

$$\begin{cases} \dot{E}_1 = \dot{U} + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_2 = \dot{U} + \dot{I}_2 Z_2 \end{cases} \quad (2)$$

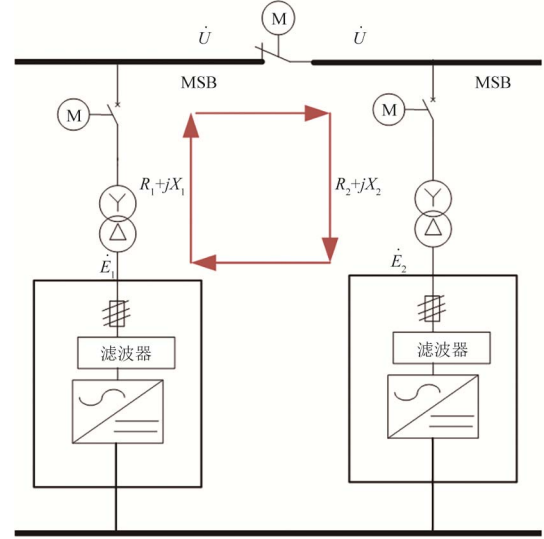


图1 直流微网交流并联输出电站系统环流架构图

Fig. 1 DC Microgrid AC Parallel Output Power Station System Circulating Current Architecture Diagram

环流 $\dot{I}_{loop}$ 定义为两逆变器输出电流的矢量差:

$$\dot{I}_{loop} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad (3)$$

式中: $\dot{I}_1$ 为逆变器1支路电流; $\dot{I}_2$ 为逆变器2支路电流; $\dot{E}_1$ 为逆变器1输出端电压, $\dot{E}_2$ 为逆变器2输出端电压。

若两逆变器输出电压相位同步, 则 $\dot{E}_1 = E_1 \angle 0^\circ$ 、 $\dot{E}_2 = E_2 \angle 0^\circ$, 此时环流可简化为

$$\begin{cases} \dot{I}_{loop} \approx \frac{E_1 - E_2}{Z_{eq}} + \dot{U} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 Z_2} \\ Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Z_{eq} 为等效阻抗。

幅值差 $\Delta E = E_1 - E_2$ 直接驱动与 Z_{eq} 成反比的环流分量, 主要表现为有功环流(因电压同相位, 电流与电压同相)。

若两逆变器输出电压幅值相等($E_1 = E_2 = E$), 但存在相位差 $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, 即 $\dot{E}_1 = E_1 \angle \varphi_1$, $\dot{E}_2 = E_2 \angle \varphi_2$, 则环流可表示为

$$\dot{I}_{loop} \approx j \frac{E \Delta\varphi}{Z_{eq}} + \dot{U} \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 Z_2} \quad (5)$$

相位差 $\Delta\varphi$ 激发与 Z_{eq} 成反比的无功环流分量(因电流超前/滞后电压, 对应无功功率交换)。

环流强度与并联点电压和各逆变器输出电压之差成正比, 与逆变器输出阻抗及线路阻抗之和成反比。在实际系统中, 逆变器输出阻抗的差异是环流持续存在的核心条件, 其来源可分为2类。

1) 物理阻抗差异。受逆变器硬件参数（如I绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）导通电阻、直流母线电容等效电阻（Equivalent Series Resistance, ESR）、输出滤波器电感值）离散性影响，不同逆变器的物理输出阻抗（ $R_{phys}+jX_{phys}$ ）难以完全一致。如，滤波器电感的制造公差可能导致 X_{phys} 偏差5%~10%，直接改变支路电流分配特性。

2) 控制等效阻抗差异。逆变器的控制策略（如恒功率控制、下垂控制）会引入“虚拟阻抗”，其本质是通过调节输出电压补偿负载变化，等效于在物理阻抗上叠加一个可控的虚拟阻抗（ $R_{ctrl}+jX_{ctrl}$ ）。若各逆变器控制参数（如下垂系数、比例积分调节器增益）不匹配，或控制环路延迟不同步，会导致等效阻抗 $Z_{eq,i}=R_{phys,i}+R_{ctrl,i}+j(X_{phys,i}+X_{ctrl,i})$ 存在显著差异。如，某逆变器为抑制谐波放大而增大虚拟阻抗 X_{ctrl} ，会导致其输出电压对电流变化的敏感度降低，与其他逆变器形成电压差，从而激发环流。

当各逆变单元的输出阻抗（包含物理阻抗和控制引入的等效阻抗）存在差异时，即使并联点电压相同，各单元输出电压也会因阻抗差异而产生不平衡，进而驱动无功环流产生。

2 自适应虚拟阻抗设计

虚拟阻抗是一种基于控制算法的软件实现方法。该方法在逆变器闭环控制（多采用电压电流双环控制）的基础上增加上一个虚拟环节，该环节根据输出功率大小求得相应的虚拟电压降，并将其叠加到电压环的参考信号上，相当于引入了一次阻抗放大的间接反馈。通过对引入位置及其特性进行设计，可实现对逆变器等效输出阻抗的主动调节。

2.1 自适应机制和模块设计

固定虚拟阻抗法的参数无法适应负载或线路阻抗的变化。为克服这一局限性，本文提出将虚拟阻抗值设计为逆变器瞬间输出功率的函数。选择逆变器输出的有功功率 P 和无功功率 Q 作为检测量，通过计算三相系统的瞬间功率，计算此时的瞬时 P 和 Q 。虚拟阻抗值 X_v 随逆变器输出功率增加（尤其是偏离额定功率时）而进一步增大。

定义性能指标函数 J 为功率均分误差的平方和，将虚拟阻抗参数 X_v 作为决策变量。

当逆变器容量相同时

$$J = \sqrt{(Q_{ref} - Q_1)^2 + (Q_{ref} - Q_2)^2} \quad (6)$$

$$Q_{ref} = (Q_1 + Q_2)/2 \quad (7)$$

式(6)和式(7)中： J 为功率均分误差的平方和为性能指标函数； Q_{ref} 为逆变器的无功功率给定参考值； Q_1 为逆变器1实际无功功率； Q_2 为逆变器2实际无功功率。

当逆变器容量不同时

$$J = \sqrt{[Q_{ref1}(Q_1 + Q_2) - Q_1]^2 + [Q_{ref2}(Q_1 + Q_2) - Q_2]^2} \quad (8)$$

$$Q_{ref1} = Q_{N1}/(Q_{N1} + Q_{N2}) \quad (9)$$

$$Q_{ref2} = Q_{N2}/(Q_{N1} + Q_{N2}) \quad (10)$$

式(8)~式(10)中： J 为功率均分误差的平方和为性能指标函数； Q_{ref1} 为逆变器1的无功功率给定参考值； Q_{ref2} 为逆变器2的无功功率给定参考值； Q_1 为逆变器1实际无功功率； Q_2 为逆变器2实际无功功率； Q_{N1} 为逆变器1额定无功功率； Q_{N2} 为逆变器2额定无功功率；

自适应算法的目标就是要找到令 J 最小对应的虚拟阻抗值，因而可以运用梯度下降法写出虚拟阻抗更新律为

$$X_v(k+1) = X_v(k) - \mu X \cdot \partial J / \partial X_v \quad (11)$$

式中： $X_v(k)$ 为当前虚拟阻抗值； $X_v(k+1)$ 为下一步长虚拟阻抗值； μX 为自适应步长，用于对参数更新速度和稳定性进行控制； J/X_v 为性能指标 J 对于虚拟阻抗参数的梯度（偏导），反映当前阻抗对于提高功率均分效果的变化。

通过这个梯度的不断计算，阻抗值沿着他的相反方向不断更新，最后达到最优解法的附近。

2.2 控制策略实现架构

将自适应虚拟阻抗模块嵌入标准的逆变器并联控制框架中，形成完整的自适应控制策略，控制架构见图2。图2中， m 为有功下垂系数， n 为无功下垂系数， U_{abc} 为逆变器的输出电压， U_d 和 U_q 分别为dq坐标系中的电压值， I_{abc} 为逆变器的输出电流。 I_q 为dq坐标系中的电流值， f_0 代表空载时的频率， U_0 为空载时的电压， θ_{ea} 为功率角度。

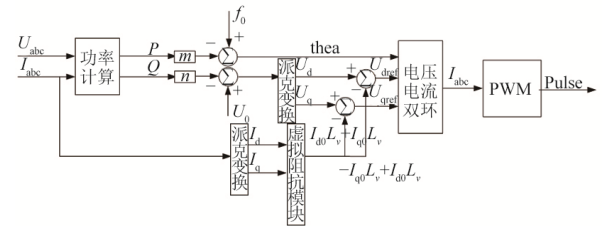


图2 基于自适应阻抗的逆变器并联控制框架图

Fig. 2 Block Diagram of Inverter Parallel Control Based on Adaptive Impedance

自适应算法模块实时计算最优虚拟阻抗，通过叠加虚拟电压降落，动态调整逆变器的等效输出特性，最终实现对环流的自适应抑制和功率均分优化。

功率计算环节：采集逆变器输出端的三相电压和电流，通过坐标变换（abc/dq）计算瞬时 P 和 Q 。自适应算法模块：接收本机功率信息（ P , Q ），并通过总线或直接采样获取系统平均功率信息，计算

功率偏差, 为避免抖动过快, 对实时采样功率采用低通滤波处理。根据预设的梯度下降规则, 实时计算并更新虚拟阻抗值 X_v 。虚拟阻抗计算及叠加: 基于实时更新的 X_v , 以及测量得到的输出电流(在 dq 坐标系下进行), 计算虚拟电压降落

$$V_{\text{virtual}_d} = -I_{q0}X_v + I_{d0}X_v \quad (12)$$

$$V_{\text{virtual}_q} = I_{d0}X_v + I_{q0}X_v \quad (13)$$

式(12)和式(13)中: V_{virtual_d} 为叠加虚拟阻抗后虚拟电压跌落 d 轴值; V_{virtual_q} 为叠加虚拟阻抗后虚拟电压跌落 q 轴值; I_{d0} 为逆变器输出电流 d 轴值; I_{q0} 为逆变器输出电流 q 轴值。

将 V_{virtual_d} 和 V_{virtual_q} 叠加到原始电压参考信号 U_d

和 U_q 上, 生成新的电压参考指令 $U_{d\text{ref}}$ 和 $U_{q\text{ref}}$ 。将新的电压参考指令输入电压电流双闭环控制器, 生成调制波信号, 经PWM发生器驱动逆变器功率开关器件。

3 仿真分析与验证

为验证所提自适应虚拟阻抗控制策略的有效性, 在MATLAB/Simulink环境下搭建了直流组网(输入DC 1 000 V)的逆变器并联仿真模型, 分别在逆变器容量相同(见图3和表1)和逆变器容量不同(见图4和表2)2种条件下进行仿真验证。

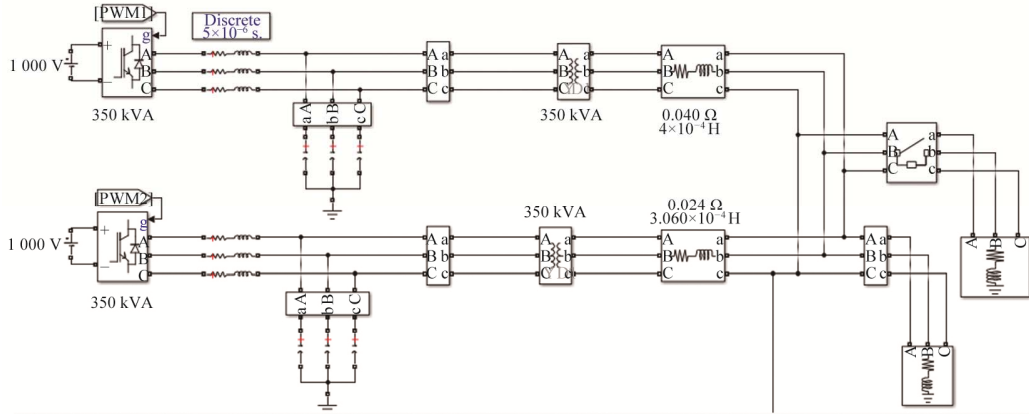


图3 逆变器容量相同情况下仿真模型

Fig. 3 Simulation Model for Same Inverter Capacities

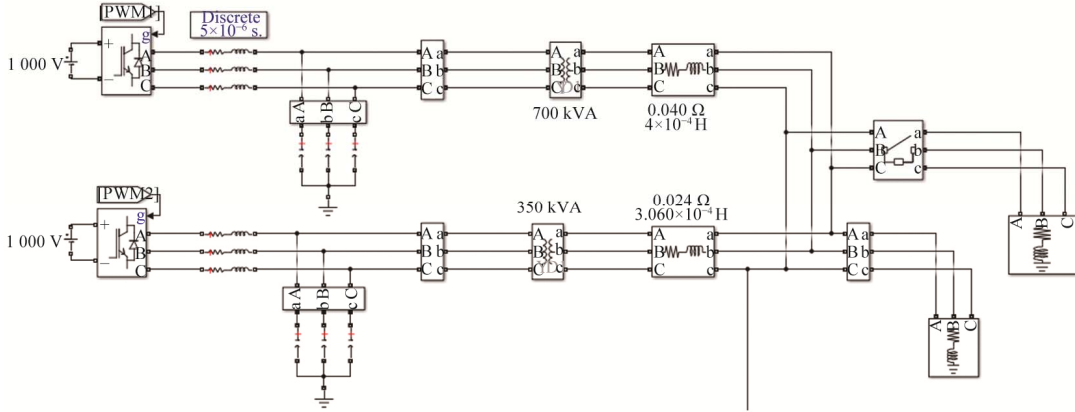


图4 逆变器容量不同情况下仿真模型

Fig. 4 Simulation Model for Different Inverter Capacities

表1 350 kVA 逆变器容量相同输出变压器参数设置

Tab. 1 Output Transformer Parameter Settings with 350 kVA Same Capacity

逆变器	参数	数值
1	输出隔离变压器容量/kVA	350
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400
2	输出隔离变压器容量/kVA	350
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400

表2 350 kVA 逆变器容量不同输出变压器参数设置

Tab. 2 Output Transformer Parameter Settings with 350 kVA Different Capacity

逆变器	参数	数值
1	输出隔离变压器容量/kVA	700
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400
2	输出隔离变压器容量/kVA	350
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400

3.1 仿真算例 1

逆变器容量相同,均为350 kVA(见表3和表4),其中逆变器1的线路阻抗较逆变器2的线路阻抗大。交流电网侧电压为400 V,频率为50 Hz,初始负荷为 $P=150$ kW, $Q_L=150$ kVar,在1 s时突加负荷 $P=100$ kW, $Q_L=100$ kVar,并在2 s时突卸该负荷。

未加入虚拟阻抗的两相同容量逆变器输出的有功 P 、无功 Q 、电压 U 和频率 f 的对比波形见图5。

表3 交流公共母排参数

Tab. 3 AC Common Bus Parameters

参数	数值	参数	数值
交流母排电压/V	400	初始负荷 P /kW	150
初始负荷 P /kW	150	交流母排频率/Hz	50
突加负荷 P /kW (1 s)	100	初始负荷 Q_L /kVar	150
突卸负荷 P /kW (2 s)	100	突加负荷 Q_L /kVar (1 s)	100
交流母排电压/V	400	突卸负荷 Q_L /kVar (2 s)	100

表4 逆变器容量一致下仿真参数

Tab. 4 Simulation Parameters With Consistent Inverter Capacity

逆变器	参数	数值
1	输出滤波电感/H	6×10^{-4}
	输出滤波电容/F	15×10^{-4}
	输出隔离变压器容量/kVA	350
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400
	输出线路电阻/ Ω	0.04
	输出线路电感/H	4×10^{-4}
2	输出滤波电感/H	6×10^{-4}
	输出滤波电容/F	15×10^{-4}
	输出隔离变压器容量/kVA	350
	输出隔离变压器阻抗/%	3.5
	输出变压器变比	620/400
	输出线路电阻/ Ω	0.024
	输出线路电感/H	3.06×10^{-4}

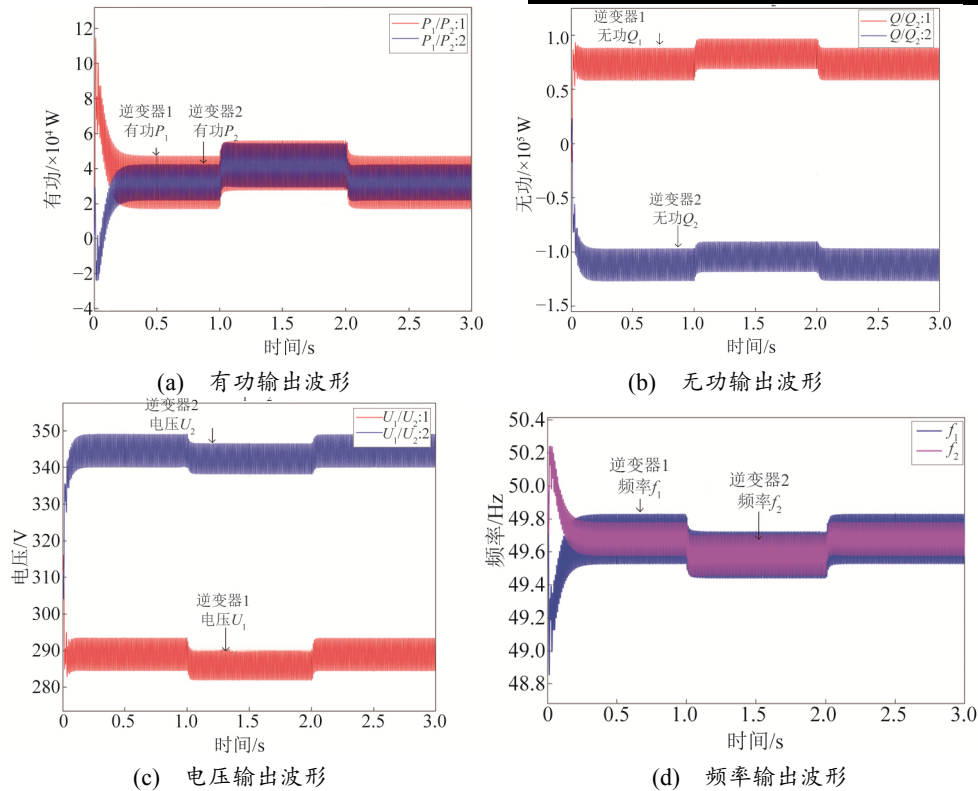


图5 未加入虚拟阻抗下两逆变器输出波形

Fig. 5 Output Waveforms of Two Inverters Without Adding Virtual Impedance

由于两逆变器容量相同,两支路的差异仅由线路阻抗引起。未加入虚拟阻抗下两支路功率输出存在无功偏差和电压偏差,有功功率和电网侧频率也存在少许偏差。在稳态功率输出的不同阶段,功率和电压均存在偏差;在突加和突卸负荷的瞬态过程中,分配偏差更明显。

据前述计算公式,对两逆变器的三相环流和功率均分误差的平方和 J 的相同容量仿真结果进行分析见图6和图7。结果表明,三相环流最大值为 a 相,其峰值为812.6 A;功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间最大为152 900 VA,稳态约129 800 VA。

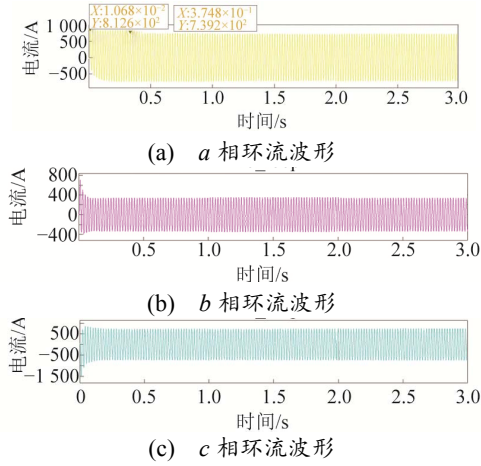


图6 未加入虚拟阻抗下两逆变器支路三相环流随时间变化波形

Fig. 6 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches Without Adding Virtual Impedance

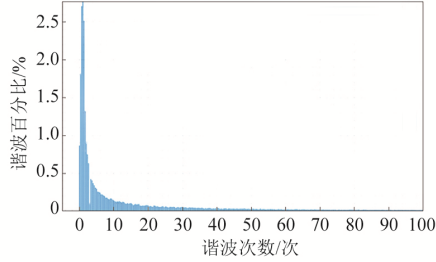
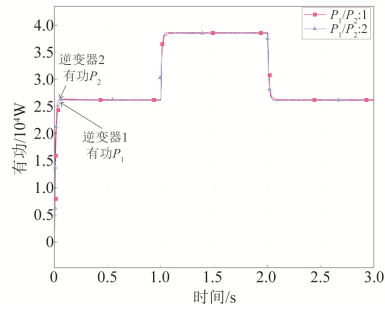


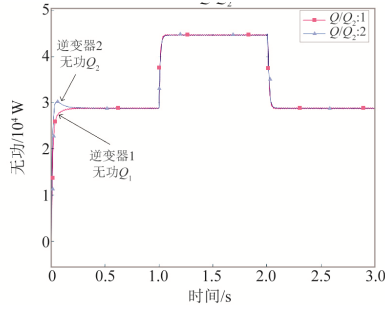
图8 交流网侧电压谐波

Fig. 8 Harmonic of AC Grid Side Voltage

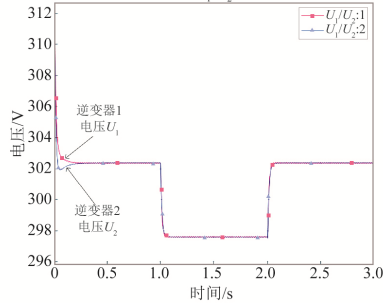
据本文控制策略设计自适应步长，加入自适应虚拟阻抗环节后，两支路的相同容量功率输出和电



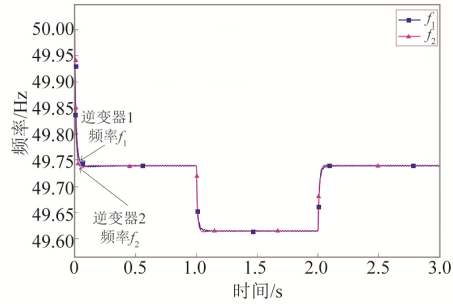
(a) 有功输出波形



(b) 无功输出波形



(c) 电压输出波形



(d) 频率输出波形

图10 加入虚拟阻抗下两逆变器输出波形

Fig. 10 Adding Virtual Impedance to Output Waveforms of Two Inverters

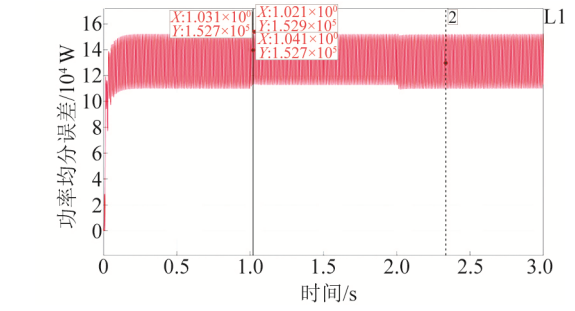


图7 未加入虚拟阻抗下两逆变器支路功率均分误差的平方和J随时间变化波形

Fig. 7 Time-Varying Waveform of Sum of Squares of Power Balance Errors J of Two Inverter Branches Without Adding Virtual Impedance

进一步分析，相同容量交流网侧的供电特性见图8和图9。电压谐波为3.45%，电流谐波为4.13%。

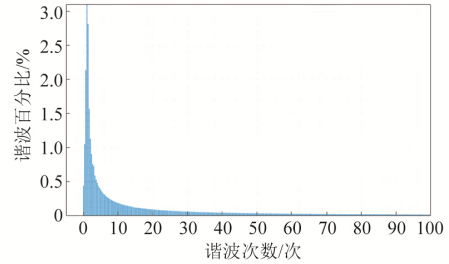
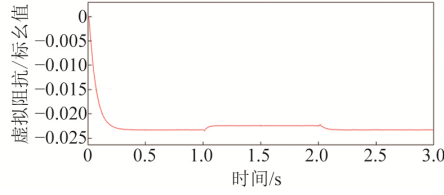


图9 交流网侧电流谐波

Fig. 9 Harmonic of AC Grid Side Current

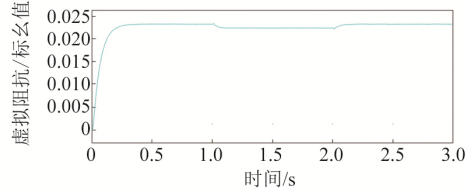
压输出一致，波形重叠，见图10。

两支路相同容量虚拟阻抗值随突加突卸负载特



(a) 逆变器 1 支路虚拟阻抗随时间变化波形

性动态变化, 偏差基本保持一致, 见图11。



(b) 逆变器 2 支路虚拟阻抗随时间变化波形

图 11 两逆变器支路虚拟阻抗随时间变化波形

Fig. 11 Time Varying Waveform of Virtual Impedance of Two Inverter Branches with Adding Virtual Impedance

根据前述计算公式, 对2个相同容量逆变器的三相环流和功率均分误差的平方和 J 的仿真结果进行分析见图12和图13。结果表明, 三相环流最大值为 a 相, 其峰值为8.462 A, 对比未加入虚拟阻抗下的812.6 A, 降低了98.9%; 功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间最大值为698.9 VA, 稳态约39.15 VA, 对比未加入虚拟阻抗下瞬间最大值152 900 VA和稳态值129 800 VA, 分别降低了99.5%和99.9%。

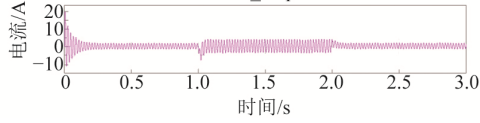
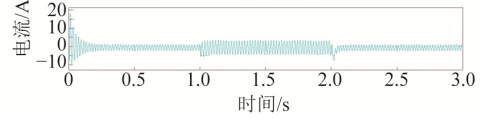
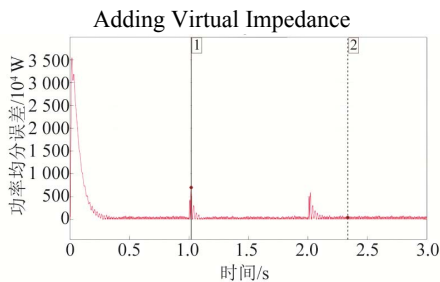
(a) a 相环流波形(b) b 相环流波形(c) c 相环流波形

图 12 两逆变器支路三相环流随时间变化波形

Fig. 12 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches with

图 13 两逆变器支路功率均分误差的平方和 J 随时间变化波形Fig. 13 Time-Varying Waveform of Sum of Squares of the Power Balance Errors J of Two Inverter Branches with Adding Virtual Impedance

相同容量交流网侧的供电特性见图14和图15。

交流网侧电压谐波为2.3%, 电流谐波为4.11%。

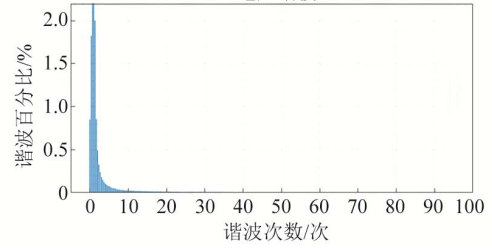


图14 交流网侧电压谐波

Fig. 14 Harmonic of AC Grid Side Voltage

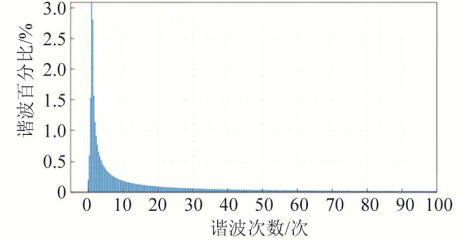


图 15 交流网侧电流谐波

Fig. 15 Harmonic of AC Grid Side Current

本文提出的自适应虚拟阻抗控制策略能在稳态和动态工况下自适应调节两支路阻抗值, 显著提高功率均分精度, 对比未加入虚拟阻抗下的812.6 A, 三相环流降低了98.9%; 功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间降低了99.5%, 稳态降低了99.9%。同时, 系统在负载突变时的动态响应较快, 电压跌落较小, 电网电压恢复速度较快, 有效提升了逆变器并联系统的稳定性和运行效率。

3.2 仿真算例 2

在该算例中, 2个逆变器容量不同。逆变器1容量为700 kVA, 逆变器2容量为350 kVA, 其他仿真条件与仿真算例1相同。

1) 未加入虚拟阻抗下的不同容量仿真结果见图16。结果表明, 未加入虚拟阻抗下两支路逆变器的无功并未按照1:2进行分配(图示标出第2阶段, 逆变器1的无功功率为47.8 kVA, 逆变器2的无功功率为242.1 kVA); 电压也存在一定偏差; 频率和无功功率基本一致。

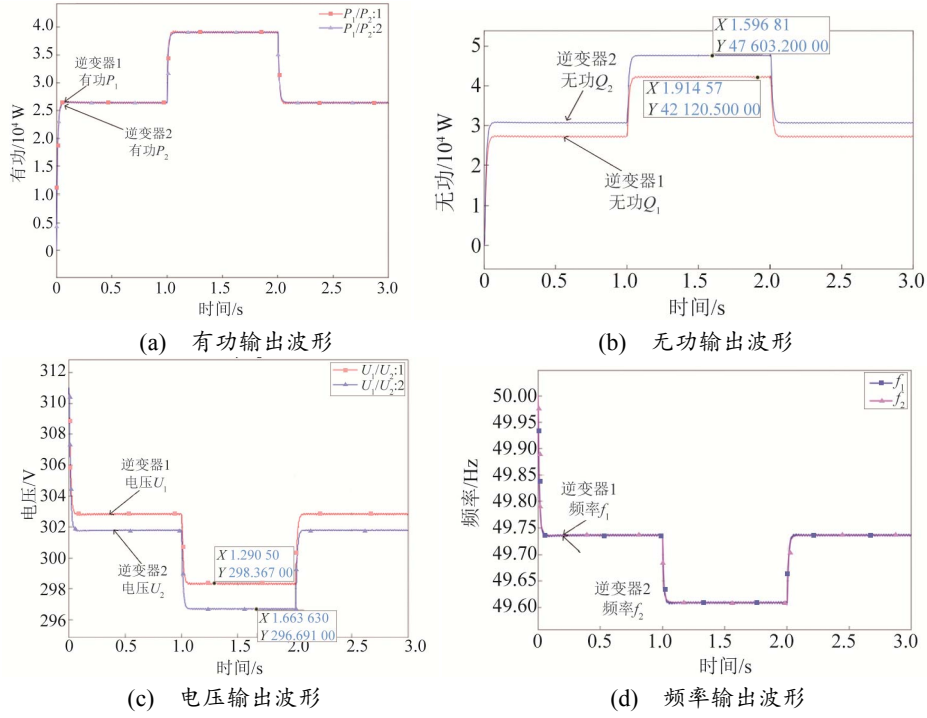


图 16 未加入虚拟阻抗下两逆变器输出波形

Fig. 16 Output Waveforms of Two Inverters Without Adding Virtual Impedance

据前述计算公式, 对2个不同容量逆变器的三相环流和功率均分误差的平方和 J 的仿真结果分析见图17和图18。

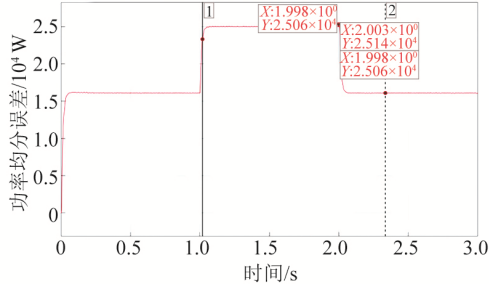
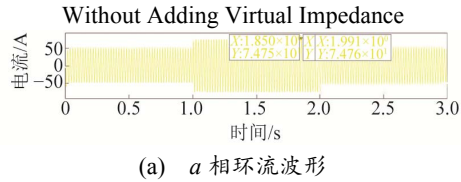
图 17 未加入虚拟阻抗下两逆变器支路功率均分误差的平方和 J 随时间变化波形Fig. 17 Time-Varying Waveform of Sum of Squares of Power Balance Errors J of Two Inverter Branches Without Adding Virtual Impedance

图 18 未加入虚拟阻抗下两逆变器支路三相环流随时间变化波形

Fig. 18 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches Without Adding Virtual Impedance

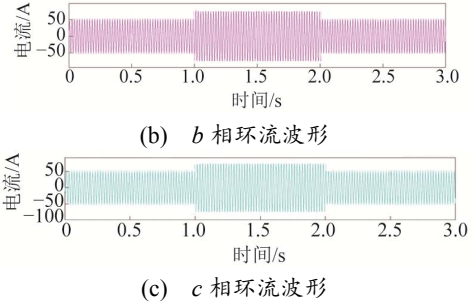


图 18 未加入虚拟阻抗下两逆变器支路三相环流随时间变化波形 (续)

Fig. 18 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches Without Adding Virtual Impedance (Continued)

结果表明, 三相环流最大值为 a 相, 其峰值为74.76 A; 功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间最大值为25 140 VA, 稳态值约16 100 VA。

2) 加入虚拟阻抗下的不同容量仿真结果见图19和图20, 自适应虚拟阻抗环节后两逆变器的分配功率比为1:2 (图示标出来第2阶段, 逆变器1的无功功率为63.7 kVA, 逆变器2的无功功率为31.7 kVA)。瞬态负载突变时将在0.1 s内恢复, 见图19。两支路虚拟阻抗值随突加突卸负载特性动态变化, 见图20。交流网侧电压谐波为2.55%, 电流谐波为3%。

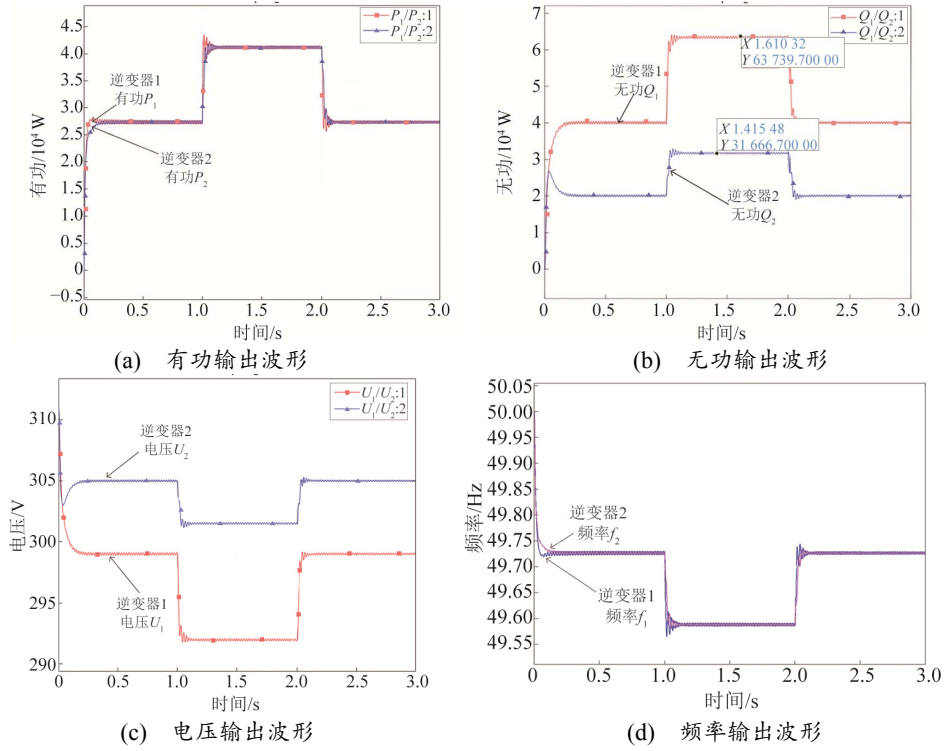


图 19 加入虚拟阻抗下两逆变器无功功率输出

Fig. 19 Output Waveforms of Two Inverters with Adding Virtual Impedance

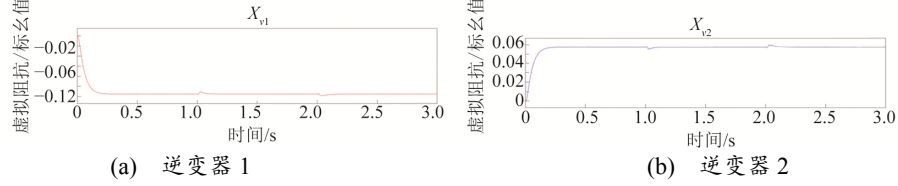


图 20 2 个逆变器支路虚拟阻抗实时变化值

Fig. 20 Real Time Changes in Virtual Impedance of Two Inverter Branches

据前述计算公式,对2个不同容量逆变器的三相环流和功率均分误差的平方和 J 的仿真结果分析见图21和图22。结果表明,三相环流最大值为 a 相,其峰值为25.61 A,对比未加入虚拟阻抗下的74.76 A,降低了50.2%;功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间最大值为4 607 VA,稳态值约119.5 VA,对比未加入虚拟阻抗分别降低了81.7%和99.2%。

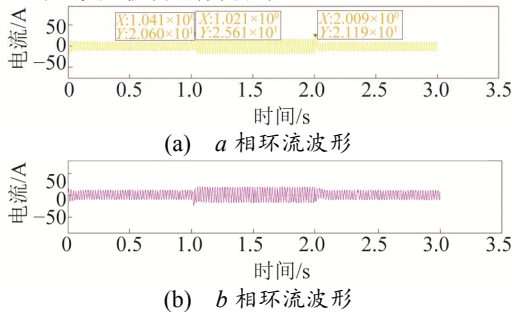


图 21 两逆变器支路三相环流随时间变化波形

Fig. 21 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches with Adding Virtual Impedance

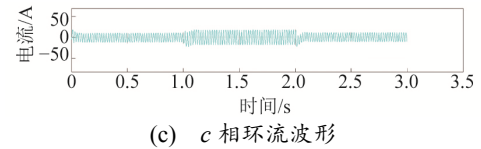
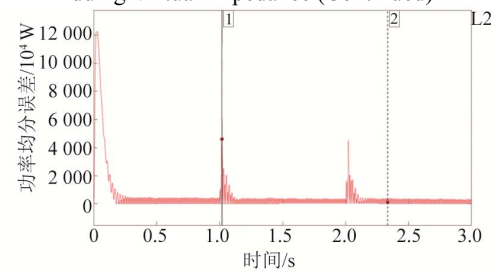


图 21 两逆变器支路三相环流随时间变化波形 (续)

Fig. 21 Time-Varying Waveform of Three-Phase Loop Current in Two Inverter Branches with Adding Virtual Impedance (Continued)

图 22 两逆变器支路功率均分误差的平方和 J 随时间变化波形Fig. 22 Time-Varying Waveform of Sum of Squares of Power Balance Errors J of Two Inverter Branches with Adding Virtual Impedance

由图19~图22可知, 负荷稳态和瞬态条件下, 2台不同容量的逆变器输出有功功率与无功功率能按照1:2进行分配, 对比未加入虚拟阻抗下的三相环流降低50.2%; 功率均分误差的平方和 J 在负载突变瞬间降低81.7%, 稳态降低99.2%。瞬态过程的过渡较为平稳且时间相对较短, 负载突加后, 自适应方案的功率波动幅度最小, 重新达到均分稳态的速度较快, 在0.1 s内分别实现了功率和电压的恢复。此外, 在稳态下, 交流网侧电压THD<5%, 自适应方案引入的虚拟阻抗未对稳态电压波形造成负面影响。

采用本文提出的自适应虚拟阻抗控制方法, 可有效提高稳态和动态工况下的有功和无功功率的均分精度, 并在系统负载突变下能快速动态调节, 有效提升了逆变器并联系统的稳定性和运行效率。

4 结论

详细论述了直流组网环境下逆变器并联系统的环流问题及其抑制方法, 明确了环流产生的根本原因因为各并联单元的等效输出阻抗不同, 导致输出电压不一致。针对这一问题, 提出了一种基于梯度下降思想的虚拟阻抗自适应算法, 并通过仿真验证了所提方案在精确分配功率、维持良好输出电压质量以及增强系统动态稳定性方面的显著优越性。该研究为解决船舶新能源直流组网逆变器并联系统的环流难题提供了一种高效、灵活、低成本的软件解决方案, 对提高直流组网系统的运行效率与可靠性具有重要意义, 具有较高的理论价值与工程应用前景。

参考文献:

- [1] 林宇轩, 李威, 朱玲, 等. 环形电流限幅下构网型变流器并网暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2026, 50(6): 72-86.
LIN Y X, LI W, ZHU L, et al. Transient Synchronous Stability Analysis of Grid Connected Inverters Under Ring Current Limiting[J]. Power System Automation, 2026, 50(6): 72-86.
- [2] 赫玉莹, 张犁, 朱贵信, 等. 直流配电系统小信号稳定性与协调控制综述[J]. 电气工程学报, 2025, 20(4): 208-224.
HE Y Y, ZHANG L, ZHU G X, et al. Overview of Small Signal Stability and Coordinated Control in DC Distribution Systems[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 208-224.
- [3] 史先强, 李睿, 吴西奇, 等. 直流直挂型超级电容储能系统的改进匹配控制与电流-功率双重限制策略[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(4): 1-10.
SHI X Q, LI R, WU X Q, et al. Improved Matching Control and Current Power Dual Limitation Strategy for DC Direct Hanging Supercapacitor Energy Storage System[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2026, 46(4): 1-10.
- [4] 张泉, 易皓, 文娅, 等. 构网型混合储能变流器直流侧的无通信自适应协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 16(8): 187-196.
ZHANG X, YI H, WEN Y, et al. Communication Free Adaptive Coordinated Control Strategy for DC Side of Grid Type Hybrid Energy Storage Converter[J]. Power System Automation, 2025, 16(8): 187-196.
- [5] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on low Bandwidth Communication with DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [6] ZHONG Q. Robust Droop Controller for Accurate Proportional Load Sharing Among Inverters Operated in Parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.
- [7] WANG X, BLAABJERG F, CHEN Z. Autonomous Control of Inverter-Interfaced Distributed Generation Units for Harmonic Current Filtering and Resonance Damping in an Islanded Microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(1): 452-461.
- [8] HU J, ZHU J, DORRELL D G, et al. Virtual Flux Droop Method-A New Control Strategy of Inverters in Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4704-4711.
- [9] TULADHAR A, HUA J, UNGER T, et al. Control of Parallel Inverters in Distributed AC Power Systems With Consideration of Line Impedance Effect[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(1): 131-138.
- [10] CHEN F, BURGOS R, BOROYEVICH D, et al. Virtual Impedance Design Considerations for Parallel Operation of Voltage Source Inverters[J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2017: 1745-1752.