

基于参数自适应 VSG 的船舶岸电逆功率抑制策略

韩笑¹, 鲁一科^{1*}, 程谦², 龚林静¹

(1. 南京工程学院 电力工程学院、沈国荣学院, 江苏 南京 211167;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106)

A Strategy for Suppressing Reverse Power in Ship-to-Shore Power Systems Based on Parameter-Adaptive VSG

Han Xiao¹, Lu Yike^{1*}, Cheng Qian², Gong Linjing¹

(1. School of Electric Power Engineering, School of ShenGuorong,

Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of transient reverse power and secondary power oscillations caused by a lack of dynamic damping in traditional fixed-parameter virtual synchronous generators (VSG) during ship-to-shore power grid connection and load transfer processes, this paper proposes an active reverse power suppression strategy based on inertia and damping adaptation. [Methods] An adaptive parameter mechanism driven by transient energy variation was established. An event-triggered mechanism based on active power deviation and virtual frequency over-limit was constructed to drive the time-domain dynamic evolution of VSG virtual parameters. In the initial stage of reverse power impact, the damping was significantly increased following a cosine envelope law to strongly absorb unbalanced transient energy. During the steady-state recovery period, the moment of inertia was bidirectionally adjusted according to the disturbance polarity; it was reduced to accelerate the dynamic response during the grid-connected climbing stage, and it was increased to suppress frequency fluctuations during the sudden load rejection stage. [Results] It was demonstrated via Matlab/Simulink simulations that under strong disturbance conditions such as grid-connection and extreme load rejection, the proposed adaptive VSG control strategy strictly limited the reverse power drop depth within the safety

threshold, effectively eliminated the secondary underdamped oscillation of active power, and precisely clamped the transient frequency deviation within the safe range.

[Conclusion] The adaptive VSG control strategy proposed in this paper overcomes the limitations of traditional VSG, which struggle to balance impact resistance and fast recovery. It achieves safe and flexible interconnection between the shore and ship power grids from the underlying control dimension, and significantly improves the grid-connection robustness of large-capacity variable-frequency shore power systems under extreme operating conditions.

Key words: ship-to-shore power; virtual synchronous generator; reverse power suppression; adaptive control

摘 要: 【目的】针对船舶岸电并网与负载转移过程中, 传统固定参数的虚拟同步发电机(VSG)因动态阻尼匮乏, 极易引发暂态逆功率及二次功率振荡的问题, 提出一种基于惯量与阻尼自适应的主动式逆功率抑制策略。【方法】构建受暂态能量变化规律驱动的参数自适应机制。基于有功偏差与虚拟频率越限状态构建事件触发机制, 以驱动 VSG 虚拟参数的时域动态演化。在逆功率冲击初期, 按余弦包络规律增大阻尼以强力吸收不平衡暂态能量; 在稳态恢复期, 依据扰动极性双向调节转动惯量; 并网爬坡阶段减小惯量以加速动态响应, 负载突卸阶段增大惯量以平抑频率波动。【结果】Matlab/Simulink 仿真表明, 在并网合闸与突卸极限负载等强扰动工况下, 本文所提自适应 VSG 控制策略将逆功率跌落深度严格限制在安全阈值以内, 有效消除了有功功率的二次欠阻尼振荡, 并将系统暂态频率偏移精准钳位在安全范围内。【结论】本

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX25_1274)

Jiangsu Postgraduate Research and Practice Innovation Program (SJCX25_1274)

文所提自适应 VSG 控制策略解决了传统 VSG 在抗冲击与快速恢复之间参数难以兼顾的局限,从底层控制维度实现了岸船电网的安全柔性互联,提升了大容量变频岸电系统在极端工况下的并网鲁棒性。

关键词: 船舶岸电;虚拟同步发电机;逆功率抑制;自适应控制

0 引言

利用岸电技术替代传统船舶辅机燃油发电,是解决靠港船舶污染排放问题、建设绿色生态港口的核心手段^[1-3]。然而,为实现供电的无缝切换,在并网过渡时,船载辅机发电机仍持续带载运行,岸电变频电源需与船侧有源电网短时并联运行。由于变频电源缺乏物理转动惯量,且船侧并非单纯的被动负载,预同步环节中微小的幅值或相位偏差均会直接引发两侧的暂态能量冲击^[4]。此外,在负载转移或突发卸时,一旦船岸两侧调度不同步,功率过剩就会引发能量回流,导致直流母线电压飙升,严重威胁设备安全,这成了岸电系统并网和转移负载的关键难题^[5]。

针对逆功率抑制问题,现有研究主要沿智能化控制、专项逻辑防护与微电网策略迁移三条路径展开。智能化控制方面,文献[6]引入改进反向传播神经网络、智能自学习控制等非线性映射方法优化岸电输出与预同步过程,克服了传统比例-积分-微分控制器适应性不足的问题,但因依赖高算力,其在强电磁暂态下的毫秒级实时响应受限。专项防护方面,文献[7]提出的基于功率逐级切换的船侧保护策略,仍属超限后响应的被动机制,难以实现暂态逆功率的主动平滑抑制。相比之下,基于虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)的控制策略^[8]通过模拟同步机转子运动方程,有效弥补了变频器惯量缺失并缓解了并网冲击,在微电网接口变换器控制与系统并网稳定性提升方面展现出巨大潜力^[9-10],已逐渐成为岸电无缝切换的主流方向^[11-13]。

然而,现有 VSG 控制多依赖固定参数的闭环调节机制^[14-15]。在面对强扰动时,其动态阻尼局限性日益突出,固化的惯量 J 与阻尼系数 D 难以兼顾稳态精度与响应速度^[16]。逆功率现象发生

时,固定阻尼难以快速消耗暂态能量,极易诱发有功欠阻尼振荡与二次功率跌落;同时,刚性的惯量又会导致系统恢复缓慢,甚至引发频率尖峰越限。可见,这种“参数固定、响应滞后”的调控模式,使得当前主流 VSG 系统难以在逆功率形成初期建立有效的抑制机制。

近年来,针对参数固化带来的控制局限,引入自适应参数调节机制已逐渐成为提升变流器动态支撑能力的前沿手段^[17-19]。然而,现有自适应策略多聚焦于常规微电网在准稳态下的微小频率波动平抑,面临反馈响应滞后、难以匹配非线性冲击特征等局限。

为了解决传统 VSG 在强扰动下动态阻尼不足、易引发功率振荡及频率越限的问题,本文提出一种基于惯量与阻尼自适应的岸电并网逆功率抑制策略。该策略通过事件触发机制,在暂态冲击时激增阻尼以吸收不平衡功率,在恢复阶段双向调节惯量以兼顾响应速度与频率稳定。最后,基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型,对比验证了所提策略在并网合闸及极限深卸载工况下,精准限制逆功率并消除二次振荡的有效性与优越性。

1 船舶岸电并网模型与逆功率机理

1.1 船舶岸电系统拓扑结构

船舶岸电并网系统主要由岸上供电系统、电缆连接设备和船舶受电系统三部分构成^[20],其主电路拓扑结构如图 1 所示。

岸上变频电源采用“AC-DC-AC”双级变换拓扑,网侧整流器维持直流母线电压稳定,直流电经逆变器转换为低压交流电,并由 LCL 滤波滤除高频谐波后,最终经隔离升压变压器输出 60 Hz 的高压^[21]。岸船两侧通过电缆实现电气互联,接入由船舶母线、船舶负载以及同步柴油发电机组构成的船舶受电系统^[22]。

基于上述物理拓扑,可抽象出岸船并网的等效电路模型,如图 2 所示。设岸电变流器输出侧的相电压有效值为 E ,经过 LCL 滤波后的公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)相电压有效值为 U 。

在并网运行状态下,变流器向船舶侧传输的三相有功功率 P 和无功功率 Q 可由传统电力系

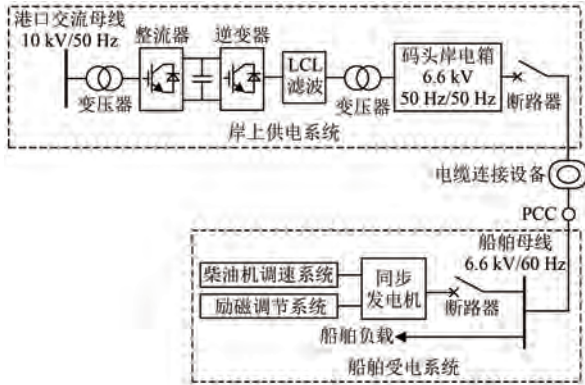


图1 船舶岸电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ship-to-shore power system

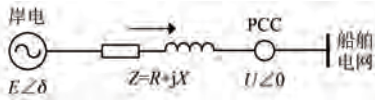


图2 船舶岸电系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of shore-to-ship power system

统潮流方程推导得出,如式(1)所示:

$$\begin{cases} P = \frac{3EU}{|Z|} \cos(\theta - \delta) - \frac{3U^2}{|Z|} \cos \theta \\ Q = \frac{3EU}{|Z|} \sin(\theta - \delta) - \frac{3U^2}{|Z|} \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: E 、 U 分别为岸电变频器输出侧、PCC的相电压有效值; $|Z|$ 、 θ 分别为线路等效阻抗的幅值、阻抗角; δ 为岸电变频器输出电压与PCC电压的功角。

在高压岸电系统中,由于线路的阻感比 $R/X \approx 0$, $\theta \approx 90^\circ$,故式(1)可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3EU}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{3U(E \cos \delta - U)}{X} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,有功功率 P 主要受功角 δ 控制,而无功功率 Q 主要受电压幅值差($E-U$)控制。这一解耦特性为后续引入VSG控制奠定了物理基础。

1.2 传统VSG模型与并网暂态特性

为了使缺乏物理惯量的变频电源具备类似同步发电机的动态支撑能力,VSG技术通过模拟同步发电机的转子运动方程和励磁方程来实现对频率和电压的控制。

(1)有功-频率控制环

传统VSG的核心在于模拟同步发电机的机

械暂态特性,其二阶转子运动方程可表示为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = P_{\text{ref}} - P_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

式中: J 为转动惯量; D 为阻尼系数; P_{ref} 、 P_e 分别为岸电系统的给定有功功率、实际输出有功功率; ω 、 ω_0 分别为VSG虚拟角频率、额定同步角频率; θ 为VSG输出的内部电角度。

需要说明的是,本文在有功-频率控制环中直接采用额定角频率 ω_0 代替实际量测角频率 ω_g 构建阻尼项。不仅有效规避了强暂态下锁相环(Phase-Locked Loop, PLL)固有的量测滞后干扰,更能促使VSG为岸电这一典型弱电网提供更为强劲的绝对频率支撑。

(2)无功-电压控制环

VSG通过模拟励磁调节器下垂特性来实现电压支撑,如式(4)所示:

$$K_q \frac{dE}{dt} = Q_{\text{ref}} - Q_e + K_v(U_{\text{ref}} - U_e) \quad (4)$$

式中: K_q 为无功积分系数; Q_{ref} 、 Q_e 分别为无功功率给定值、实际输出值; K_v 为电压下垂系数; U_{ref} 、 U_e 分别为额定电压幅值、实际输出幅值。

结合上述有功与无功控制方程,可构建传统VSG的整体控制结构,如图3所示。VSG算法输出的 E 与 θ 经合成三相参考电压指令输入电压、电流双闭环模块;经内部指令合成与闭环调节后,生成空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)驱动脉冲,最终实现对变频电源的主动支撑控制。

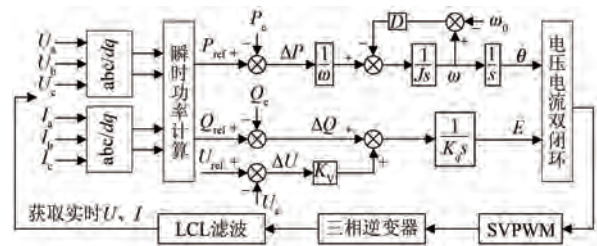


图3 经典VSG控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of classical VSG control structure

1.3 逆功率机理分析

逆功率现象是指电能从船舶有源微网非预期回流至岸电变频电源的暂态现象。岸电变频器缺乏反向能量耗散路径,逆功率会导致直流母线电

压飙升,轻则供电质量下降,重则烧毁设备甚至断电。因此,必须从控制底层进行快速抑制。

逆功率多发生于并网、负载转移及解列的过渡阶段。除了稳态下电压幅频失配,从 VSG 动态机理看,系统更易因动态阻尼匮乏,在两类典型暂态下诱发逆功率:

(1) 并网瞬间初始状态失配

合闸时两边电压也很难完全同步。只要有微小相位差或频率差,初期功率就会为负,传统 VSG 因为参数固定,未能有效吸收暂态能量,导致逆功率跌落幅度增大、持续时间延长。

(2) 短时并联运行时强扰动下的动态超调与逆功率现象

负载突卸时,船侧柴油机因巨大物理惯量,功率调节存在滞后,过剩能量将向岸电侧发生逆向馈送。这会让虚拟角频率或功角剧增,而传统 VSG 的阻尼又不够,转子过剩动能引发严重超调,一旦跌破零就造成二次逆功率。

2 自适应 VSG 逆功率抑制策略

2.1 虚拟参数小信号稳定性分析

为揭示 J 与 D 对系统动态特性的影响规律,需建立 VSG 小信号模型。假设 PCC 电压恒定,对有功传输方程在稳态工作点 δ_0 处进行泰勒展开并线性化处理,可得:

$$\Delta P_e = \frac{3EU}{X} \cos \delta_0 \cdot \Delta \delta = K_s \Delta \delta \quad (5)$$

式中: K_s 为同步整步功率系数。

将式(5)代入 VSG 转子运动方程并经拉普拉斯变换,可得有功闭环传递函数:

$$G_p(s) = \frac{\Delta P_e(s)}{\Delta P_{ref}(s)} = \frac{K_s}{Js^2 + Ds + K_s} \quad (6)$$

式(6)对应典型的二阶系统,其特征方程为

$$s^2 + \frac{D}{J}s + \frac{K_s}{J} = 0 \quad (7)$$

由此可得系统的无阻尼自然振荡角频率 ω_n 和阻尼比 ζ 为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_s}{J}} \\ \zeta = \frac{D}{2\sqrt{JK_s}} \end{cases} \quad (8)$$

为直观分析虚拟参数对系统动态响应的影

响,根据特征方程绘制了闭环极点根轨迹,如图 4 所示。

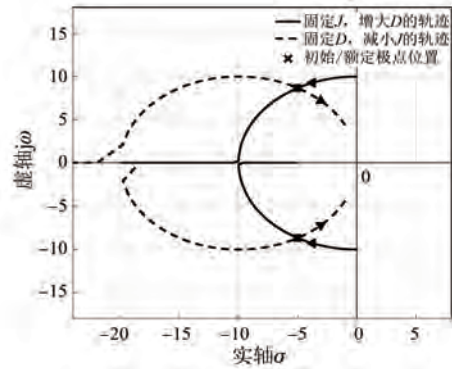


图 4 系统闭环极点的根轨迹分布图

Fig. 4 Root locus distribution of system closed-loop poles

结合理论公式与图 4 中极点的运动轨迹,可揭示虚拟参数固定化存在的固有矛盾:

(1) 阻尼系数 D 的动态矛盾: 增大 D 虽能通过过阻尼状态平抑强扰下的有功超调,但全程大 D 会导致动态响应迟缓;反之, D 过小虽有利于微小扰动快速跟踪,却在强冲击下因阻尼匮乏而诱发严重振荡与逆功率。

(2) 转动惯量 J 的动态矛盾: 保持较大的 J 能够使系统有效抵抗稳态运行中的微小频率波动。过大的 J 会导致过剩加速能量积聚、功率恢复缓慢,还易诱发严重的频率尖峰;适度减小 J 有助于系统快速逼近稳态。

固定参数 J 、 D 难以兼顾强扰动抑制与稳态恢复。因此,需引入随暂态特征自适应的机制,在逆功率时增大阻尼以吸收过剩能量,在稳态恢复时双向调节惯量,从而实现全暂态域内的参数最优协同。

2.2 基于有功越限触发的阻尼自适应策略

由于传统 VSG 控制采用固定阻尼,在强冲击工况下极易受限,难以快速吸收暂态过剩能量,往往会诱发有功功率的欠阻尼振荡。为此,本文初步设计了受暂态有功功率偏差 $|\Delta P| = |P_{ref} - P_e|$ 驱动的阻尼自适应函数,如式(9)所示:

$$D = D_0 + K_d \cdot f(|\Delta P|) \quad (9)$$

式中: D_0 为稳态时的基础阻尼; K_d 为动态阻尼补偿系数。

理想的阻尼调节机制需根据功率偏差 $|\Delta P|$ 的剧烈程度进行动态补偿。然而,直接将含

有高频纹波的实测功率偏差引入闭环控制,容易在工况切换时引发控制参数的非线性突变和微分噪声放大。

为了规避这个问题,同时鉴于强扰动引发的逆功率跌落轨迹具有确定的时域变化规律,本文仅将 $|\Delta P|$ 作为事件触发的判定依据,结合暂态阻尼的补偿需求,将式(9)进一步重塑为连续可导的时域调节函数:

$$D(t) = D_0 + K_d \cdot \left\{ 1 - \cos \left[\frac{\pi(t - t_0)}{T_{\text{dip}}} \right] \right\} \quad (10)$$

式中: T_{dip} 为暂态跌落时间窗口; t_0 为检测到扰动的瞬间。

一旦越限触发,激活的阻尼自适应函数能确保阻尼系数在冲击最剧烈的时刻达到峰值,能最大化吸收暂态能量,将逆功率严格钳位在安全范围内。

2.3 基于频率特征的惯量自适应策略

当暂态冲击平抑后,系统会进入稳态恢复期。此时,虚拟惯量 J 要实现在功率爬坡时,减小惯量以加快系统响应;而负载突卸时,增大惯量以抑制频率尖峰。为此,系统实时提取虚拟频率偏差 $\Delta\omega = \omega_{\text{vsg}} - \omega_0$ 作为监测对象。与依赖外部PLL的迟滞频率检测不同,该偏差直接基于数字信息处理内部无延迟生成的状态变量与固定常数求取,其检测更新速度仅受限于底层控制周期,规避了外部硬件的量测死区。系统不仅将这种具备实时性的越限状态作为事件触发的另一保障,更将其正负极性作为判断扰动类型、决定惯量补偿方向的依据。

为应对不同极性的暂态扰动,避免在恢复期内由参数突变引发的二次振荡,本文利用一阶指数函数的单调渐近收敛特性,建立了双向的惯量自适应函数。当系统进入动态恢复期,即 $t > t_0 + T_{\text{dip}}$ 时,转动惯量 J 按照式(11)的轨迹变化:

$$J(t) = J_0 + K_J \cdot \exp \left(- \frac{t - t_1}{\tau_J} \right) \quad (11)$$

式中: J_0 为维持系统稳态抗扰的基础惯量; t_1 为系统进入恢复期的瞬间,即满足 $t_1 = t_0 + T_{\text{dip}}$; τ_J 为惯量恢复时间常数; K_J 为动态惯量补偿系数,在并网功率爬坡阶段 $K_J < 0$,在负载突卸阶段 $K_J > 0$ 。

该函数不仅能在触发瞬间提供最大惯量补偿

力度,迅速平抑频率尖峰或加速功率响应,还能确保 J 随系统趋于新稳态时平滑收敛至 J_0 ,使系统恢复稳态抗扰能力。

2.4 自适应VSG控制架构

为实现船舶岸电的无缝并网与逆功率抑制,在融合了上述变参数机制的基础上,建立了自适应VSG控制架构,如图5所示。具体的自适应参数辨识与演化控制流程如图6所示。

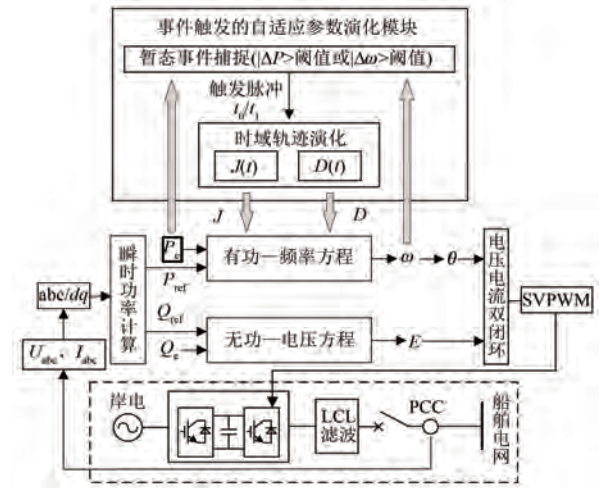


图5 自适应VSG控制架构

Fig. 5 Adaptive VSG control architecture

与传统VSG参数固化模式不同,自适应变参数演算模块依据有功偏差与频率偏差,自动判断系统当前工况,从而在稳态运行、暂态冲击及爬坡恢复三个阶段实现控制状态的无缝接力。

2.5 事件触发阈值与关键参数的设计准则

本文所提的参数时域演化策略,其核心并非引入复杂的数学自适应寻优,而是基于变频岸电系统的物理运行边界与并网规范,建立确定的事件触发防线。相关触发阈值与演化参数的设计依据如下。

(1)有功偏差触发阈值 ΔP_{th} :考虑到岸电变流器在不同工况下的运行特征, ΔP_{th} 设定为系统额定负载的5%~10%;而针对并网合闸瞬间的逆功率现象,为实现对反向暂态能量的快速阻断,其反向触发阈值设定为额定负载的2%。

(2)频率偏差触发阈值 $\Delta\omega_{\text{th}}$:本文设定 $\Delta f_{\text{th}} = \pm 0.2 \text{ Hz}$,对应 $\Delta\omega_{\text{th}} = \pm 0.4\pi \text{ rad/s}$ 。在控制逻辑中,该阈值不仅作为极端失稳时的底线防护触发条件,系统更实时提取频率偏差的极性,作为动态恢复期非对称调节惯量方向的判据。

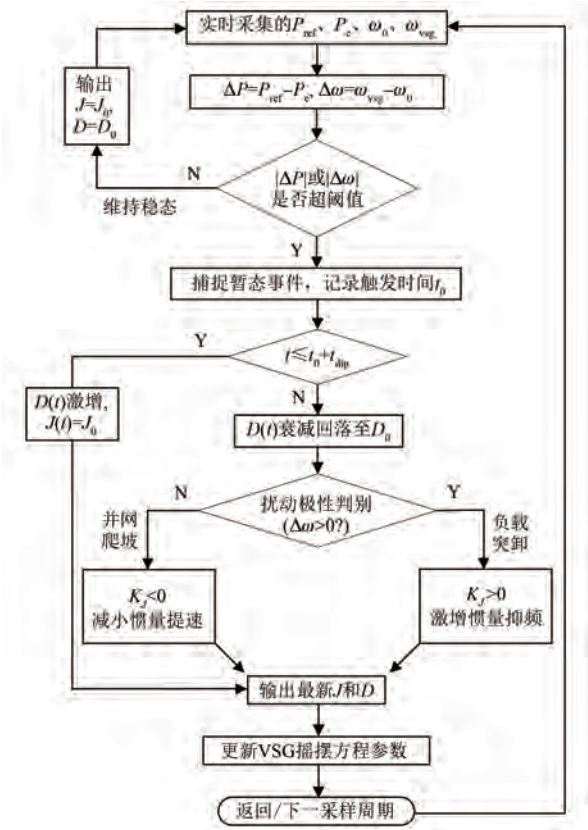


图 6 自适应变参数辨识与演化流程图

Fig. 6 Flowchart of adaptive variable-parameter identification and evolution

(3) 暂态跌落时间窗口 t_{dip} : 该参数不由控制层主观决定, 其受限于高压变频器直流母线电容对不平衡能量的物理耐受极限, 以及低电压穿越的规范时间。为确保在硬件过压保护动作前完成能量重塑, 通常整定为 $0.05 \sim 0.1 \text{ s}$ 。

综上, 上述阈值参数均由底层物理极限与入网标准明确约束, 具有唯一的工程确定性, 无需引入额外的二次自适应寻优算法, 保障了控制策略在强电磁暂态工况下的快速响应和工程可靠性。

2.6 自适应控制策略机理对比分析

区别于文献[17-19]中广泛采用的基于状态偏差线性反馈的自适应策略, 本文策略创新性地提出了时域分段解耦的调控理念: 在逆功率冲击发生初期, 系统被事件快速触发, 仅利用激增的高阻尼 D 强力吸收不平衡功率, 避免了高频求导噪声对惯量参数的干扰; 而在剧烈冲击平抑后, 系统进入动态恢复期, 此时再依据虚拟频率偏差极性状态, 对转动惯量 J 进行非对称的双向自适应补偿。这种在暂态初期阻尼主导、恢复期惯量主导

的时序解耦调控, 从理论上彻底消除了多参数动态耦合带来的振荡风险, 实现了抗扰性与平滑性的有效兼顾。

3 仿真分析

为验证所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建了高压兆瓦级变频岸电 ($6\,600 \text{ V}/60 \text{ Hz}, 3.0 \text{ MVA}$) 与船舶电网并联运行的仿真模型, 系统主电路及控制参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameter

参数名称	参数值
电网电源电压/kV	10
电网电源频率/Hz	50
岸电输出电压/kV	6.6
岸电输出频率/Hz	60
变流器输出电压/V	690
变流器输出频率/Hz	60
船侧额定有功负荷/MW	0.5
船侧额定无功负荷/Mvar	0.325
船侧电压/kV	6.6
船侧频率/Hz	60
船载发电机额定功率/MW	2
变流器侧滤波电感 L_f/mH	0.15
LCL 滤波电容 $C/\mu\text{F}$	1 200
负载侧滤波电感 L_g/mH	0.05
无功积分系数 $K_q/(\text{var}\cdot\text{s}\cdot\text{V}^{-1})$	500
电压下垂系数 $K_v/(\text{var}\cdot\text{V}^{-1})$	150
传统 VSG 转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	60
传统 VSG 阻尼 $D/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1})$	12 000

仿真设置了岸电并网合闸和极限负载突卸两种典型工况, 对比了三种策略: 传统固定参数 VSG、常规自适应 VSG 以及本文所提参数自适应 VSG 控制。为限制频率变化率, 将 J 设置为 $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 为确保满载稳态频率偏差满足国标要求, 将 D 设为 $12\,000 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, 旨在验证本文所提算法在强扰动下的动态性能优势。

3.1 工况一: 岸电并网及逆功率抑制

工况一旨在验证所提算法在并网时的同步追踪精度与逆功率抑制能力。在预同步控制下, 船岸两侧于 0.4 s 时顺利合闸。

并网前后系统电压与频率的动态响应分别如图7与图8所示。合闸后,两侧系统建立刚性电气连接,频率实现共轨。需要特别说明的是,图8所示频率为PCC锁相环的实际量测频率,而非VSG内部虚拟转速。

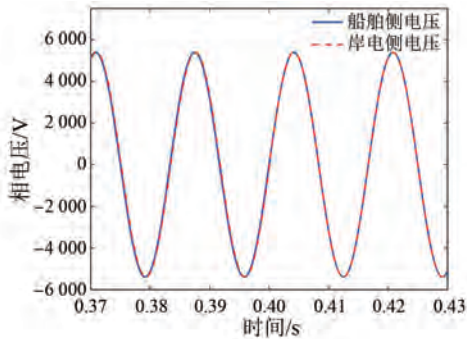


图7 并网前后船岸两侧电压A相波形

Fig. 7 Phase-A voltage waveforms of ship and shore sides before and after grid connection

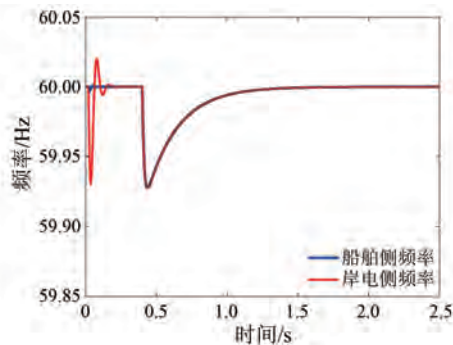


图8 船岸两侧频率变化图

Fig. 8 Frequency variation curves of ship and shore sides

并网岸电侧有功功率变化对比图、系统频率抗扰动对比如图9、10所示。由图9可知,传统VSG发生明显的逆功率跌落,极小值深达 -180 kW ,系统随即陷入剧烈的欠阻尼振荡,直至 2.7 s 左右才缓慢平息并爬坡恢复至 500 kW 额定满载状态。

由图10可知,传统VSG控制的逆功率振荡源于阻尼比与响应速度的固有耦合。常规自适应VSG控制策略虽能将逆功率极值削减至 -100 kW ,但仍有明显下冲与迟滞。相比之下,本文所提自适应VSG控制策略通过时域解耦打破了这一瓶颈:合闸瞬间,将逆功率极值严格限制在 -40 kW ,仅为额定功率的8%,有效钳位了频率偏移,避免了过压或跳闸风险,实现了无振荡的快速爬坡。需指出,工程中为防止倒灌误触发,通常在

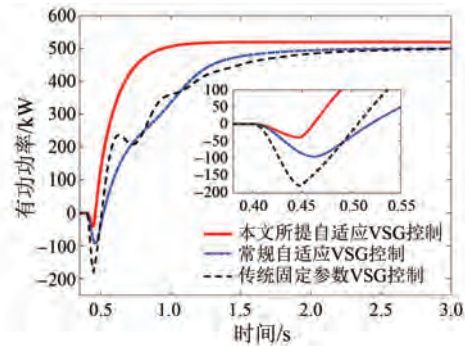


图9 并网岸电侧有功功率变化对比图

Fig. 9 Comparison of active power variation on shore side during grid connection

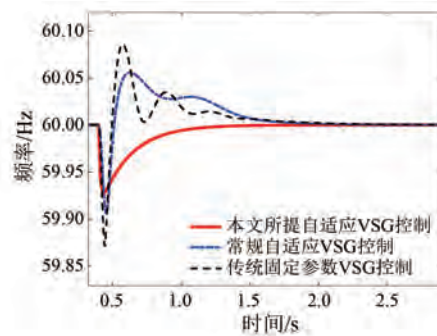


图10 并网前后系统频率抗扰动对比图

Fig. 10 Comparison of system frequency disturbance rejection before and after grid connection

保留约5%正向负载时解列柴油发电机,随后岸电顺滑接管至满载稳态。

三种策略的对比并网电流波形如图11所示。由图11可知,0.4 s合闸时传统VSG控制产生了剧烈的三相冲击涌流,极易触发变频器过流保护;常规自适应VSG控制算法受限于参数反馈调节的迟滞性,其电流包络线仍经历了较长时间的振荡过渡期。而本文自适应VSG控制算法控制下的三相电流仅出现微小的直流偏置与暂态非周期分量,随后电流幅值平滑跟随功率上升至稳态峰值 62 A ,未出现明显冲击电流。

自适应参数变化图如图12所示。由图12可知:在合闸后逆功率跌落击穿阈值的同一毫秒级瞬间,系统打破参数固化状态,事件驱动 D 迅速沿着预设的非线性包络线激增至高阻尼区间,吸收不平衡功率。之后功率向 500 kW 爬坡阶段,相应减小转动惯量 J 以提高响应速度。

3.2 工况二:极限负载突卸与抗扰动性验证

为验证系统应对极限负载突卸的动态支撑与

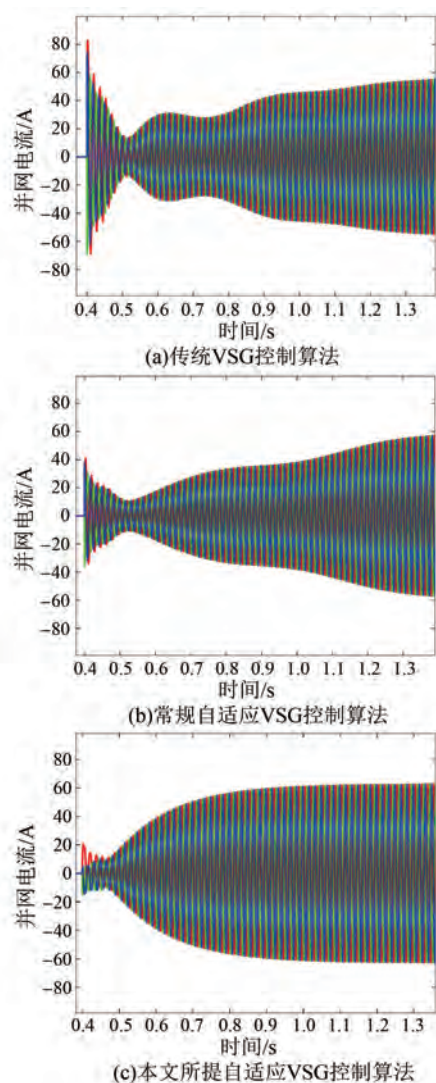


图 11 并网电流变化图

Fig. 11 Graph of grid-connected current variations

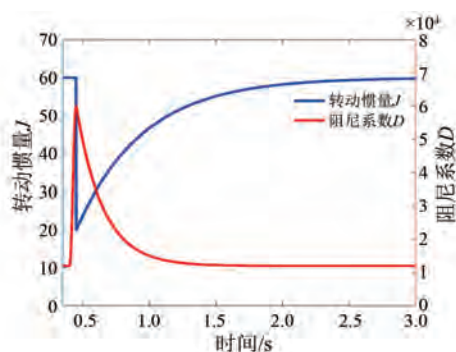


图 12 工况一下自适应参数变化图

Fig. 12 Variation of adaptive parameters under condition one

逆功率抑制能力, 本文特选取岸船并网合闸后、柴油发电机尚未解列脱网的短时并联过渡期作为恶

劣测试工况, 结果如图 13 所示。系统初始稳定运行于 500 kW 额定负载, 3.0 s 时突卸 90% 负载, 即功率指令骤降至 50 kW。

由图 13 可知, 传统 VSG 控制由于动态阻尼受限, 产生极大欠阻尼振荡, 功率超调量越过零轴, 诱发了 -150 kW 的二次逆功率。常规自适应 VSG 控制出现了轻微的功率下冲与恢复期迟滞, 而本文所提自适应 VSG 控制算法则表现出极强的控制鲁棒性, 在时间窗口内的快速抑制, 使功率曲线沿近似一阶惯性轨迹平滑下降并稳定于 50 kW, 有效抑制了负载突变引发的逆功率。

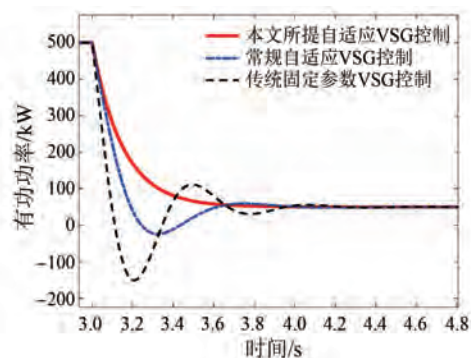


图 13 负载突卸工况下岸电侧有功功率对比图

Fig. 13 Comparison of shore-side active power under load sudden unloading condition

三种策略的对比岸电侧频率抗扰动对比图如图 14 所示。由图 14 可知, 突卸负载瞬间, 传统 VSG 控制受限于固有物理耦合, 频率峰值高达 60.145 Hz, 且在剧烈回弹中积聚反向能量, 诱发低至 59.96 Hz 的二次频率跌落。常规自适应 VSG 控制算法虽将峰值降至 60.085 Hz, 但仍受困于波峰超调与二次回落的欠阻尼动态耦合。相比之下, 本文所提自适应 VSG 控制算法将频率峰值严格钳位在 60.07 Hz, 并在稳态恢复期实现了平滑的一阶阻尼收敛, 全程无二次跌落与后续振荡, 充分验证了其在极端卸载工况下卓越的稳频能力。

负载突卸工况下的岸电侧电流变化对比图如图 15 所示。由图 15(a) 可知, 突卸负载后, 传统 VSG 控制算法的输出电流随之发生明显的低频振荡。由图 15(b) 可知, 常规自适应 VSG 收敛过程仍伴随轻微迟滞。相比之下, 如图 15(c) 所示, 本文 VSG 算法的输出电流幅值呈近似一阶指数规律平滑衰减, 快速且无超调地过渡至轻载稳态, 有效消除了由逆功率超调引发的二次冲击电流与低

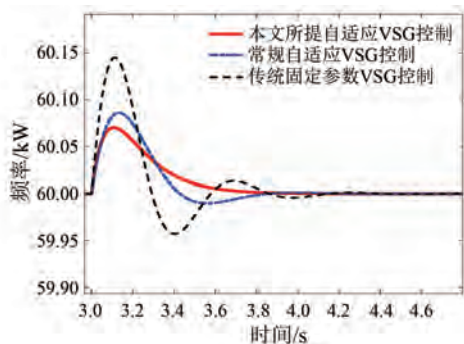


图 14 岸电侧频率抗扰动对比图

Fig. 14 Comparison of shore-side frequency disturbance rejection performance

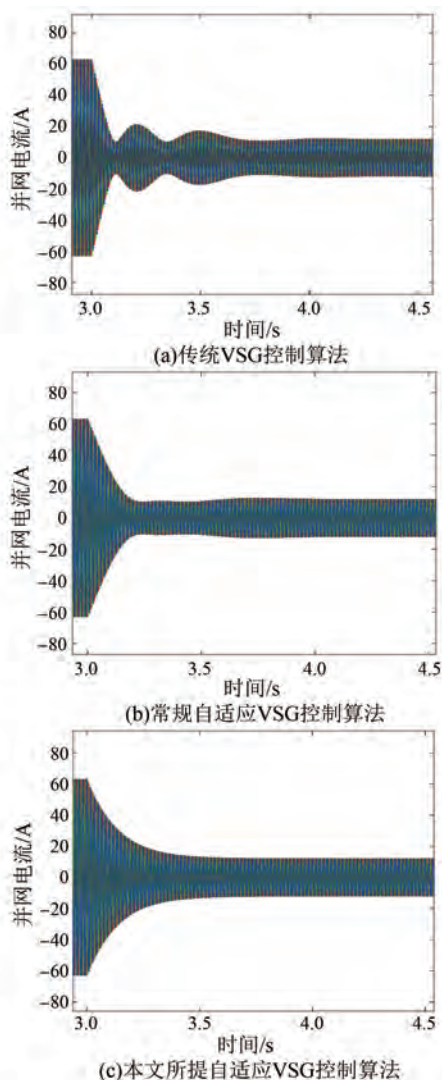


图 15 岸电侧电流变化图

Fig. 15 Graph of shore-side current variation

频振荡现象。

自适应参数变化图如图 16 所示。由图 16 可

知,在 3.0 s 负载突卸时 J 与 D 同步增大,快速吸收暂态过剩能量,从而实现了频率超调的快速平抑与功率的平滑过渡。

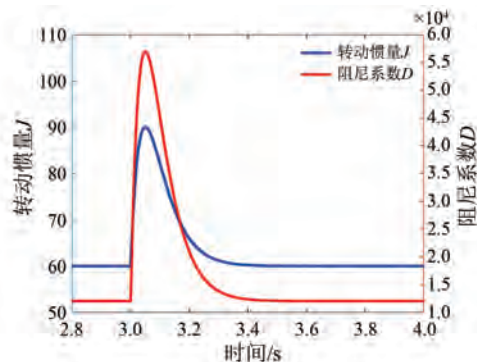


图 16 工况二下自适应参数变化图

Fig. 16 Variation of adaptive parameters under condition two

值得注意的是,所构建的极限深卸载工况不仅用于考核算法抗扰边界,更映射了港口作业中船舶离港时岸电向船侧发电机切换的最恶劣暂态过程。仿真结果充分印证了所提策略具备双向暂态抑制能力,其控制裕度既能平稳覆盖负载转移与解列等常规操作,亦能在极限扰动下确保优异的频率与功率稳定性。

4 结语

本文针对船舶岸电并网及负载转移中的暂态逆功率问题,提出了一种基于事件触发与时域轨迹成型的参数自适应 VSG 控制策略。仿真验证表明,该策略在强扰动初期能动态提升阻尼以快速吸收暂态能量,并在稳态恢复期依据扰动极性双向调节惯量,从而有效化解了抗冲击与快响应之间的矛盾。最终,本文所提自适应 VSG 控制策略成功地将逆功率深度及频率偏移限制在安全范围内,从底层控制维度保障了岸船电网的安全柔性互联,显著提升了大容量变频岸电系统的并网鲁棒性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

鲁一科进行了方案设计、仿真分析与论文撰

写,韩笑、程谦、龚林静参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation analysis and paper writing were carried out by Lu Yike. The manuscript was revised by Han Xiao, Cheng Qian and Gong Linjing. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 周剑. 船舶岸电管理对策研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
Zhou J. Research on countermeasures of ship shore power management [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [2] 卞松辉. 船舶岸电无缝并网控制策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.
Bian S H. Research on seamless grid-connected control strategy of ship shore power [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019.
- [3] 张成. 船舶岸电并网无缝切换控制策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Zhang C. Study on seamless switching control strategy for ship-shore power grid [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [4] 吴启洋. 船舶岸电控制方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2024.
Wu Q Y. Research on ship shore power control method [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2024.
- [5] 陈建东, 叶志浩, 黄靖, 等. 靠港船舶接入港口岸电时负载转移策略研究[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3): 147-153.
Chen J D, Ye Z H, Huang J, et al. Research on load transfer strategy when berthing ships connecting to shore-to-ship power supply [J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3): 147-153.
- [6] 姚文龙, 裴春博, 池荣虎, 等. 基于智能自学习控制的船舶微电网预同步控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 82-93.
Yao W L, Pei C B, Chi R H, et al. Pre-synchronization control strategy for a microgrid of merchant marine with intelligent self-learning control [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 82-93.
- [7] 刘慧文, 邢宏伟, 房鑫炎, 等. 基于功率逐级切换控制的内河船舶负荷转供策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 44-50.
Liu H W, Xing H W, Fang X Y, et al. Inland river ship-load transfer strategy based on step-by-step power switching control [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2023, 60(8): 44-50.
- [8] 张磊, 杨奕飞, 李士刚, 等. 基于改进 VSG 的船舶岸电并网控制策略[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(8): 112-117.
Zhang L, Yang Y F, Li S G, et al. Control strategy of ship shore power grid connection based on improved VSG [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(8): 112-117.
- [9] 范广胜, 朱琳, 封洋燊, 等. 交直流混合微电网并联接口变换器的 VSG 控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 68-74+80.
Fan G S, Zhu L, Feng Y Y, et al. VSG control strategy of AC/DC hybrid microgrid parallel interfacing converter [J]. Electric Machines & Control Applications, 2021, 48(3): 68-74+80.
- [10] 李智, 刘辉, 刘明波, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.
Li Z, Liu H, Liu M B, et al. Research overview of grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. Electric Machines & Control Applications, 2023, 50(11): 1-10.
- [11] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 基于无锁相环的虚拟同步发电机离并网切换控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(9): 90-95.
Geng H X, Wang W J, Tang S, et al. Research on off-grid/on-grid switching control strategy of virtual synchronous generator without PLL [J]. Electric Machines & Control Applications, 2021, 48(9): 90-95.
- [12] Patil V, Mishra S, Pullaguram D R. Performance analysis of homogeneous and heterogeneous microgrid based on droop and VSG-based control [C] // 2023 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy, Trivandrum, India, 2023:1-6.
- [13] Wang S, Xie Y X. Virtual synchronous generator (VSG) control strategy based on improved damping and angular frequency deviation feedforward [J]. Energies, 2023, 16(15): 5635.
- [14] 刘志坚, 王伟铭, 骆军, 等. 基于 MPC 的虚拟同

- 步双馈风机并网系统次同步振荡抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 75-84.
- Liu Z J, Wang W M, Luo J, et al. Sub-synchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG grid-connected systems based on MPC [J]. Electric Machines & Control Applications, 2024, 51(11): 75-84.
- [15] 党克, 田勇. 基于电网电压前馈的 VSG 平衡电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(1): 35-40.
- Dang K, Tian Y. VSG balanced current control strategy based on grid voltage feedforward [J]. Electric Machines & Control Applications, 2021, 48(1): 35-40.
- [16] Shi T, Sun J, Han X, et al. Research on adaptive optimal control strategy of virtual synchronous generator inertia and damping parameters [J]. IET Power Electronics, 2024, 17: 121-133.
- [17] 徐合力, 吴启洋, 高岚. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电并网自适应控制[J]. 中国航海, 2025, 48(2): 110-117+126.
- Xu H L, Wu Q Y, Gao L. Adaptive control research for the grid connection of ship shore power based on VSG [J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 110-117+126.
- [18] 韩鸿霖, 王星璐, 林存浩. 基于自适应 VSG 控制策略的光伏混合储能系统研究[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(2): 159-170.
- Han H L, Wang X L, Lin C H. Research on photovoltaic hybrid energy storage system based on adaptive VSG control strategy [J]. Electric Machines & Control Applications, 2025, 52(2): 159-170.
- [19] 耿昊翔, 王维俊, 唐帅, 等. 虚拟同步发电机的参数自适应控制策略研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(3): 17-24.
- Geng H X, Wang W J, Tang S, et al. Research on parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3): 17-24.
- [20] 田金柱, 黄昊容, 沈刚. 大型工程船舶新增高压岸电系统设计及应用[J]. 船舶工程, 2022, 44(增刊1): 409-413+435.
- Tian J Z, Huang H R, Shen G. Design and application of high voltage shore power system for large crane carrier [J]. Ship Engineering, 2022, 44(S1): 409-413+435.
- [21] 许镇杰. 船舶岸电系统设计方案[J]. 港口装卸, 2022(2): 47-50.
- Xu Z J. Design scheme of ship shore power system [J]. Port Operation, 2022(2): 47-50.
- [22] 刘杜, 孙佳星, 乔康恒, 等. 港口船舶岸电电源系统研究综述[J]. 船电技术, 2021, 41(6): 29-34.
- Liu D, Sun J X, Qiao K H, et al. Review of development of the shore power system for port ship [J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2021, 41(6): 29-34.

收稿日期:2026-03-16

收到修改稿日期:2026-05-31

作者简介:

韩 笑(1969—),男,硕士,教授,研究方向为船舶岸电并网控制,847969544@qq.com;

* 通信作者:鲁一科(2000—),男,硕士研究生,研究方向为船舶岸电并网控制,1094967845@qq.com。