DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.173 **中图分类号**：TM341 **文献标志码**：A

应用于电动汽车充电桩的负荷虚拟同步机及其频率自适应控制

吕志鹏[1]，李立生[2]，宋振浩[1]，杨 飞[1]，王自力[3](中国电源学会学生会员)，陈燕东[3](中国电源学会高级会员)

(1.国网上海能源互联网研究院有限公司，上海 200120；2.国网山东省电力公司，济南 250001；3.湖南大学电气与信息工程学院，长沙 410082)

摘要：针对公共电网频率波动时充电桩前级AC-DC整流器电能质量恶化等问题，在应用负荷虚拟同步机LVSM(load virtual synchronous machine)控制策略的基础上提出1种具有频率自适应能力的电流内环控制方法。首先，建立LVSM频率环路小信号模型，分析可知虚拟频率将跟随偏离基频的电网频率而变化。其次，设计1种降低计算复杂度的电流内环频率自适应准比例谐振控制器以抑制并网电流谐波注入电网。最后，仿真结果表明所提控制器能够主动响应电网电压及频率变化，并改善调节过程中的电能质量，验证了理论分析的正确性。

关键词：充电桩整流器；负荷虚拟同步机；频率自适应；离散准比例谐振控制

Load Virtual Synchronous Machine and Frequency-adaptive Control Applied to Electric Vehicle Charging Piles

LÜ Zhipeng[1], LI Lisheng[2], SONG Zhenhao[1], YANG Fei[1], WANG Zili[3], *Student Member*, *CPSS*, CHEN Yandong[3], *Senior Member*, *CPSS*

(1. State Grid Shanghai Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200120, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To address the problem of power quality deterioration in a charging pile's front-stage AC-DC rectifier under frequency fluctuations of public power grid, a current inner-loop control method with frequency adaptation capability is proposed based on the application of a load virtual synchronous machine (LVSM) control strategy. First, a small-signal model of the LVSM frequency loop is established, and analysis results show that the virtual frequency will follow the grid frequency that deviates from the fundamental frequency. Second, a frequency-adaptive quasi-proportional-resonant controller with reduced computational complexity is designed for the current inner-loop to suppress grid-connected current harmonics injection into the grid. Finally, simulation results show that the proposed controller can actively respond to changes in grid voltage and frequency while improving the power quality during the regulation process, which verifies the theoretical analysis.

Keywords: Charging pile rectifier; load virtual synchronous machine (LVSM); frequency adaptation; discrete quasi-proportional-resonant control

收稿日期：2024-03-19；**修回日期**：2024-05-15，2024-06-05；**录用日期**：2024-06-15；**网络首发日期**：2024-09-15

基金项目：国家电网公司科技资助项目(5400-202155459A-0-0-00)

This work is supported by the project of State Grid Corporation of China under the grant 5400-202155459A-0-0-00

电动汽车作为世界能源技术革命和国家新能源战略的重要组成部分，是国家七大战略新兴产业之一。目前，我国纯电动汽车保有量突破千万辆，充电设施也在并行发展。2021 年，充电桩保有量已达175.8万台，换电站663座。车桩比更是从2015

年的 6.31 降至 2022 年的 2.51。随着规模化电动汽车充电桩容量的发展，更易加剧高峰负荷的供电压力，加大对配电网造成的冲击，不利于配电网系统的安全稳定运行。此外，传统为了维持电网功率平衡而采取切除充电桩用户的应对措施对经济效益影响较大。为突破高渗透率电动汽车 EV(electric vehicle)充电桩接入带来的电网平衡难题，亟需研究能根据电网频率和电压波动来调节充电桩负荷功率，实现“网-荷”动态供需平衡的控制技术[1-2]。

目前，有关“网-荷”之间的平衡研究主要源于对并网变换器应用虚拟同步机的控制思想[3]，下文简称负荷虚拟同步机 LVSM(load virtual synchronous machine)控制策略。LVSM 对电网电压暂降、频率突变等故障情况下的主动响应能力可以降低负荷对电网的冲击，加强负荷对电网的感知能力。文献[4]借鉴虚拟同步机的转子运行特性，提出 1 种包含虚拟惯性的功率补偿控制策略，并配合可再生能源发电为系统提供频率支撑；文献[5]提出 1 种动态虚拟阻尼系数的有源阻尼控制方法，通过动态调节虚拟同步机阻尼系数，同时结合调制信号反馈有源阻尼方法，增强“网-荷”之间的同步稳定性；文献[6]考虑充电桩后级 DC-DC 变换器特性，提出 1 种虚拟电阻 VR(virtual resistance)控制策略以改善传统基于比例积分PI(proportional-integral)控制的弱调频性能；文献[7]额外针对 EV 辅助调频问题，提出了考虑用户充电需求的 EV 智能充放电控制策略，以满足用户需求为首要前提，再提供电网辅助调频服务。此外，文献[8]为了缓解充放电时功率的波动，引入模型预测控制提高了充电系统的动态性能；文献[9]分别提出 3 种不同充放电模式下适应电网频率变化的 EV 电池充放电策略及实现方法，通过“网-荷”互动提高电网频率稳定性；文献[10]提出 1 种惯性与阻尼自适应调节的 LVSM 优化策略，通过在功率调节不同阶段自主调节 LVSM 惯性和阻尼系数，改善整流器功率响应的动态性能。

另一方面，考虑到实际公共电网可能出现的频率偏移，已有研究主要从锁相环或数字离散过程中对变换器进行频率自适应控制。文献[11]首先考虑了传统电压源型 PWM 整流器的频率自适应性，并系统归纳了比例谐振 PR(proportional-resonant)控制器在电压等外部扰动下的稳动态行为；在此基础上，文献[12]针对并网逆变器提出了谐振环节一体化的频率自适应控制策略，显著降低了并网电流的总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)。针对电动汽车后级 DC-DC 谐振变换器开关频率变化范围宽的特点，文献[13]提出 1 种自适应窄频率范围变频与定频混合调制策略来进行改善；文献[14]提出 1 种无电流传感器的自适应频率控制，能够在不同功率下自适应调节开关频率以优化电流纹波；文献[15]提出了 1 种基于自适应频率的数字控制 Buck 变换器，通过小数分频和检测模数转换器 ADC(analog to digital converter)输出，有效改善了电路的瞬态响应。此外，文献[16]提出 1 种考虑频率自适应的基于改进型 Park 变换的单相并网逆变器锁相环，改善了常规单相并网逆变器内部锁相环因自身锁相自由度不足引起锁相误差的问题；文献[17]和文献[18]分别对基于二阶广义积分器 SOGI(second-order generalized integrator)的锁相环结构进行改进，抑制电网谐波畸变并提高了锁相环精度；文献[19]提出 1 种新型基于交叉解耦双复系数滤波器的锁相环来消除电压不平衡和谐波分量，实现频率自适应；文献[20]在梳状滤波器锁相环中引入校正环节来改善其动态响应慢的缺点，实现准确跟踪电网电压相位的目的。

值得注意的是，上述大部分已有研究或仅考虑功率调节性能，或所提控制器缺乏主动支撑电网的能力，鲜有研究同时关注 LVSM 动态响应过程中电能质量恶化的问题。因此，本文受上述研究启发，首先建立 LVSM 有功环路的小信号模型，并分析频率调节过程中传统电流内环控制器存在的问题。其次，建立离散域的准比例谐振 QPR(quasi-proportional-resonant)控制器传递函数模型，并提出 1 种降低计算复杂度的频率自适应方法，能够使 LVSM 在主动响应调节过程中自适应变化的电网频率，改善充电桩整流器的并网电能质量。

1　充电桩基本拓扑及控制策略

在分布式超级充电站中，采用大规模的充电桩并联运行能灵活地消纳新能源，提高居民的出行效率及可靠性。充电桩中前级 AC-DC 变换器拓扑结构如图 1 所示。图中：V_{dc} 为供给电动汽车储能电池的直流电压；直流侧电容 C_{dc} 与电动汽车储能电池的等效电阻 R_s 并联连接；S_1~S_6 为 SPWM 脉宽调制的开关管；L_f 和 R_L 分别为输出侧滤波电路上的有损电感和等效电阻；L_s 为网侧电感；v_x (x=a, b, c)为整流桥的输出电压；i_{L_x} (x=a, b, c)为滤波电感电流；i_{C_x} (x=a, b, c)为滤波电容电流；u_{g_x} (x=a, b, c)为网侧电压。

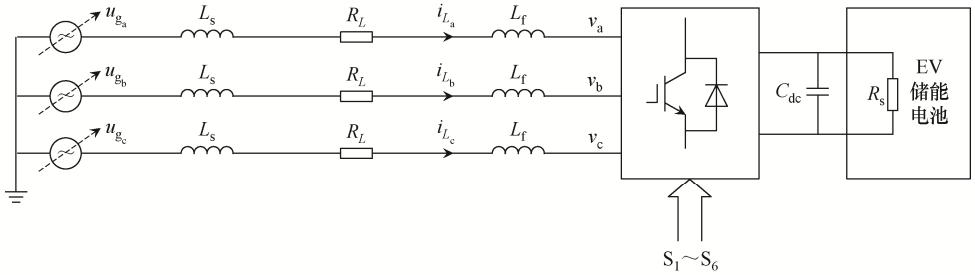


图 1　充电桩前级变换器拓扑结构

Fig. 1 Topology of charging pile's front-stage converter

LVSM 通过自动改变 EV 负载从电网中提取的功率来提供电网支持，可应用于在功率消耗方面可控且前端有整流器的直流负载上，使大规模充电站具备电网友好型接口。LVSM 通过模拟转子运动特性并嵌入同步机二阶数学模型来生成虚拟电动势的相位角。虚拟电动势则由无功调节环路产生，输出回路上的积分器可使无功功率调节不受稳态误差和模拟励磁惯性的影响。

鉴于大部分已有文献关于无功环路的结构均相同，因此本文主要关注隐含频率信息的有功环路对电流内环的影响，有功环路的运动方程可表示为

$$\begin{cases} \dfrac{P_e}{\omega_n}-\dfrac{P_{set}}{\omega_n}+D_p\Delta\omega+K_\omega(\omega-\omega_g)=J\dfrac{d\Delta\omega}{dt} \\ P_{set}=U_{dcref}\cdot(U_{dcref}-U_{dc})\cdot(K_p+K_i/s) \end{cases} \tag{1}$$

式中：P_e 为从电网吸收的有功功率；P_{set} 为负载有功功率给定值；ω 为 LVSM 的虚拟角频率；ω_n 为额定频率；ω_g 为交流侧电网频率；$\Delta\omega=\omega-\omega_n$；$J$ 为惯性系数；D_p 为阻尼系数；K_ω 为下垂系数；U_{dc} 为直流侧电压；U_{dcref} 为直流侧电压参考值；K_p 与 K_i 分别为直流链电压 PI 控制器的比例增益和积分增益。

事实上，LVSM 控制器中嵌入的下垂机制正是使其主动参与电压和频率调节的根本原因，但大部分研究均假定交流侧电网频率 ω_g 近似为额定频率 ω_n 以使阻尼系数 D_p 等效为下垂系数 K_ω，忽略主导调速器的结构来简化摇摆方程[21]。随着大规模及大功率充电桩的逐步接入，电网难以避免存在非理想型的工况，上述简化无法有效改善参考频率变化导致电流内环电能质量恶化的影响。

因此，本文通过在如图 1 所示的 EV 充电桩前级 AC-DC 变换器中实施具有频率自适应能力的 LVSM 控制策略，在参与电网频率及电压响应的同时提升充电桩在非理想电网工况下的电能质量，如图 2 所示。图中：P_m 为有功功率的参考值；Q_e 为从电网吸收的无功功率，可根据瞬时功率理论计算得到；Q_{set} 为负载无功功率的给定值；Q_{ref} 为无功功率的参考值；U_n 为标称电压，U_g 为电网电压相均方根；K 为调整无功功率动态响应的积分系数；K_ω 为频率调整系数；K_u 为电压调节系数；惯性系数 J 和阻尼系数 D_p 在有功功率动态响应中占主导地位。

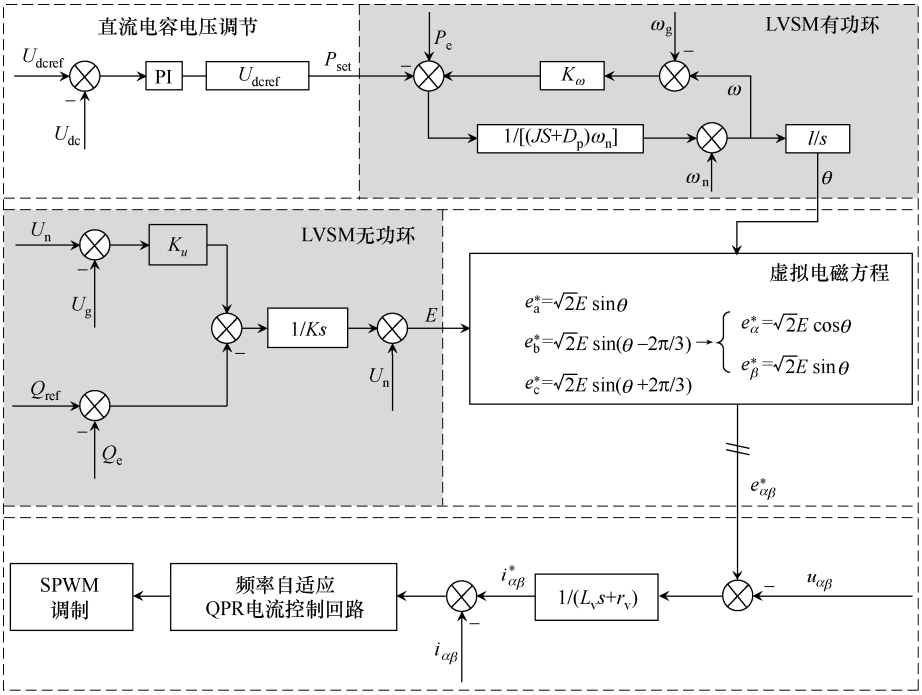


图 2 具有频率自适应能力的 LVSM 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of LVSM with frequency adaptation capability

2 LVSM 频率特性分析

2.1 有功-频率环路小信号模型

基于虚拟阻抗技术可将系统传输线路的特性设置为 $X=\omega_{\mathrm{n}}(L_{\mathrm{v}}+L_{\mathrm{l}})\gg r_{\mathrm{v}}$，其中，$\omega_{\mathrm{n}}$ 为额定角频率，L_{v} 为虚拟电感，L_{l} 为线路电感，r_{v} 为虚拟电阻。此时并网 LVSM 的功率输出表达式[22]为

$$P_{\mathrm{e}}=-3U_{\mathrm{g}}E\sin\delta/X \tag{2}$$

$$Q_{\mathrm{e}}=3U_{\mathrm{g}}(U_{\mathrm{g}}-E\cos\delta)/X \tag{3}$$

式中：E 为 LVSM 中无功环路输出的虚拟电动势；δ 为有功环路与电网之间的功率差角，且

$$\delta=\int(\omega-\omega_{\mathrm{g}})\mathrm{d}t \tag{4}$$

分析 LVSM 中隐含频率信息的有功环动态特性时，可令电网电压的小信号扰动量 $\hat{U}_{\mathrm{g}}=0$。此外，传统功率控制中存在的功率耦合现象在虚拟同步机制下可以被忽略以简化分析过程[23]。基于图 2 所示的 LVSM 控制策略和对式(2)~式(4)应用拉普拉斯变换，忽略直流项、二阶和高阶扰动后可以得到简化的有功-频率小信号控制框图如图 3 所示，图中上标“^”表示小信号扰动量。

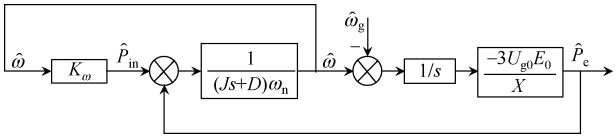


图 3 有功-频率小信号控制框图

Fig. 3 Control block diagram of active power-frequency small-signal model

进一步推导得到 LVSM 参与电网频率调节过程中的动力学模型为

$$G_{\mathrm{l}}(s)=\frac{\hat{P}_{\mathrm{e}}(s)}{\hat{\omega}_{\mathrm{g}}(s)}=\frac{3U_{\mathrm{g0}}E_0(J\omega_{\mathrm{n}}s+D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}-K_{\omega})}{JX\omega_{\mathrm{n}}s^2+(D_{\mathrm{p}}-K_{\omega})Xs+3U_{\mathrm{g0}}E_0} \tag{5}$$

忽略高阶动态量后可得稳态运行时有功功率偏差 ΔP_{e} 与电网频率偏差 $\Delta\omega_{\mathrm{g}}$ 的简化关系为

$$\Delta P_{\mathrm{e}}/\Delta\omega_{\mathrm{g}}=D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}-K_{\omega} \tag{6}$$

式(6)表征了 LVSM 提供频率主动支撑的能力。基于图 3 所示小信号框图可进一步推导得到有功控制回路的闭环传递函数为

$$G_P(s)=\frac{\hat{P}_{\mathrm{e}}(s)}{\hat{P}_{\mathrm{in}}(s)}=\frac{3U_{\mathrm{g0}}E_0}{J\omega_{\mathrm{n}}s^2+D_{\mathrm{p}}\omega_{\mathrm{n}}s+3U_{\mathrm{g0}}E_0} \tag{7}$$

可见，$G_P(s)$呈现典型的二阶特性，具有自然振荡角频率和阻尼比分别为

$$\omega_P=\sqrt{\frac{3U_{g0}E_0}{JX\omega_n}} \tag{8}$$

$$\zeta_P=0.5D_p\sqrt{\frac{X\omega_n}{3U_{g0}E_0J}} \tag{9}$$

进一步地，从图 3 可推导频率传递函数 $G_f(s)$为

$$G_f(s)=\frac{\hat{\omega}(s)}{\hat{\omega}_g(s)}=\frac{3U_{g0}E_0}{JX\omega_n s^2+(D_p\omega_n-K_\omega)Xs+3U_{g0}E_0} \tag{10}$$

同样地，$G_f(s)$也呈现具有自然振荡角频率 ω_f 和阻尼比 ζ_f的二阶特性，即

$$\omega_f=\sqrt{3U_{g0}E_0/(JX\omega_n)} \tag{11}$$

$$\zeta_f=0.5(D_p-K_\omega/\omega_n)\sqrt{X\omega_n/(3U_{g0}E_0J)} \tag{12}$$

值得注意的是，虽然 $\omega_P=\omega_f$，但 $\zeta_P>\zeta_f$意味着频率环路的响应速度比有功环路慢，即 LVSM 参与响应的时间主要受频率环路影响。同时，式(6)也说明输出功率受电网实际频率和额定频率的影响，因此有必要进一步改善电流环路电能质量。

2.2　传统电流内环控制器频域分析

通常对于信号滤波来说，为了使被控系统在所要求的谐波范围内达到所需的性能，必须在系统稳定性和噪声抑制性能之间进行权衡，以消除大部分的周期性干扰信号。传统基于 PI 的控制器需要对交流量进行坐标变换进行间接控制，但 PR 控制器因其特有的结构特性能达到与传统解耦后同步旋转坐标系下 PI 控制的性能，有助于控制器设计流程的简化。进一步地，在实际工程应用中，为了降低数字控制中的计算复杂度和增加调节自由度，常采用 QPR 结构，两者的传递函数分别为

$$G_{PR}(s)=\frac{[G_{PI}(s\pm j\omega_0)]}{2}=K_p+\frac{2K_is}{s^2+\omega_0^2} \tag{13}$$

$$G_{QPR}(s)=K_p+\frac{2K_i\omega_c s}{s^2+2\omega_c s+\omega_0^2} \tag{14}$$

式中：ω_c为截止频率；ω_0为谐振频率。通过计算式(13)的幅值可知控制器在谐振频率处增益无穷大，能对谐振频率处信号进行零稳态误差跟踪，且不影响其他频率处信号。

绘制上述电流内环控制器的频域特性如图 4 所示，各控制器增益参数均相同(K_p=1，K_i=10)。可以看到，传统 PI 控制器仅在低频段(稳态特性)具有较高增益，若对 50 Hz 及以上的正弦波进行跟踪，跟踪特性难以满足要求。比例谐振控制器在用户设定的谐振频率处(50 Hz)拥有高增益，通过将多个谐振项进行并联即可在特定频域带内进行谐波的有效抑制。此外，同等倍数增大 PR 和 QPR 控制器积分增益后，可以发现两者频带变化范围有$\Delta\omega_{QPR}>>\Delta\omega_{PR}$，这意味着实际应用中理想的 PR 控制器性能调节自由度较小，而 QPR 控制器频域特性变化范围大，更利于工程中的实时调参过程。当电网频率偏离基频较小时，可以通过增大积分增益 K_i来调整具有高增益的频带范围。但过大的积分增益可能影响系统稳定性，且电网频率可能受到冲击电流的潜在影响而导致电网频率波动范围超过高增益频带，此时传统控制器难以满足有关谐波的抑制要求，需要对应用负荷虚拟同步机的充电桩电流内环控制器进行频率自适应设计。

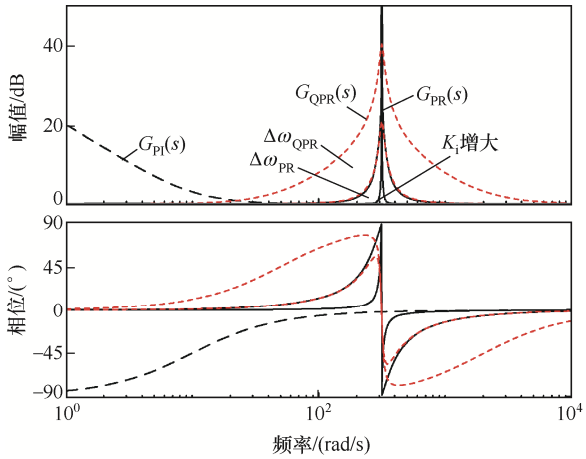


图 4　电流内环控制器的频域特性

Fig. 4 Frequency-domain characteristics of current inner-loop controller

3　控制器参数设计

3.1　LVSM 有功环路参数整定

本小节基于已建立有功环路小信号模型来设

计 LVSM 中的惯性系数、阻尼系数和频率调节系数。为了确保令用户满意的响应时间并避免输出频率振荡，将有功环路参数设计的阻尼比设定为

$$\begin{cases}0.707<\zeta_P<1\\ \zeta_f>1\end{cases} \tag{15}$$

可见，式(15)定义了有功环路欠阻尼和频率环路过阻尼的特性。同时为了使所提 LVSM 能及时与电网进行一次频率协调，将 LVSM 参与响应的时间设定为 T_P+T_f≤0.8 s，此时较快的功率环路响应时间设置为 T_P≤0.2 s。结合典型欠阻尼二阶系统中响应时间特性与式(15)，得

$$\begin{cases}T_P=4.4/(\zeta_P\omega_P)<0.2\\ 0.707<\zeta_P<1\end{cases}\rightarrow\omega_P>31.1\ \text{rad/s} \tag{16}$$

基于式(16)设定 ω_P=31.4 rad/s，此时由式(8)可推导得 J=0.047。根据式(9)可推导得到阻尼系数 D_p 的范围为

$$\sqrt{\frac{6JU_{\text{g0}}E_0}{X\omega_\text{n}}}<D_\text{p}<\sqrt{\frac{12JU_{\text{g0}}E_0}{X\omega_\text{n}}} \tag{17}$$

最后，过阻尼频率环路的参数设定可参考同样的设计思路，即设定频率环路的响应时间 T_f≤0.6 s，此时结合式(12)可得 2 个系数的统一取值范围为

$$\begin{cases}4.33\sqrt{\dfrac{JU_{\text{g0}}E_0}{X\omega_\text{n}}}<D_\text{p}\omega_\text{n}-K_\omega<36.59\sqrt{\dfrac{JU_{\text{g0}}E_0}{X\omega_\text{n}}}\\ D_\text{p}\omega_\text{n}-K_\omega=\dfrac{\Delta P_\text{e}}{\Delta\omega_\text{g}}\end{cases} \tag{18}$$

若将 LVSM 参与频率支撑能力定义为 1 Hz 的电网频率变化对应于 5 kW 的有功输出功率变化，此时即可根据式(17)和式(18)推导出 D_p 和 K_ω 的取值，且所取参数能够满足用户需求。

3.2 电流内环控制器的频率自适应设计

工程应用中通常需要对控制系统进行离散化实现，QPR 控制器仅需对谐振控制部分进行离散化，结构简单且易于实现。传统上常用 Tustin 变换(双线性变换)将频域进行离散化映射至 z 域，即

$$s\leftarrow\frac{2}{T_\text{s}}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \tag{19}$$

式中，T_s 为采样周期。但这一方法存在高频失真特性，无法适用于谐振频率较高的准谐振控制器。为了实现数字和连续时域系统之间的频率匹配，可采用 1 种称为预修正的方法，即在数字离散化实施前将所需的连续域谐振频率移动至

$$\omega_\text{spw}=\frac{2}{T_\text{s}}\tan\left(\omega_\text{h}\frac{T_\text{s}}{2}\right) \tag{20}$$

式中：ω_h 为用户设定的离散域谐振频率，$\omega_\text{h}=n\omega_0$，$n$ 为谐波频率次数；ω_spw 为严格修正频率。

为了重新计算控制器的谐振频率以跟随电网频率的变化，通常根据式(20)计算 1 个新的预修正频率。但由于涉及到正切函数的计算，实际数字控制过程将十分耗时，不利于工程推广。因此本文采用线性近似的方法进行逼近，对预修正频率进行简化后有

$$\omega_\text{pw}\approx\frac{2}{T_\text{s}}\cdot\left[(k_h\omega_\text{h}+\gamma_h)\cdot\frac{T_\text{s}}{2}\right] \tag{21}$$

式中，k_h 和 γ_h 为针对第 h 次谐波的近似系数。

通过在稳态工作点采取线性近似可以大大减少 CPU 的时间消耗，宽频域和近似频域内 9 次谐波(450 Hz)的严格预修正和线性近似比较如图 5 所示。可以看出，严格的预修正频率中包含的正切函数在高频区域非线性现象明显，而在标称频率附近的近似误差几乎可以忽略不计(f_s=10 kHz，且γ_h≈0)。因此，当电网频率波动速度较为缓慢时，无需采用式(20)实时计算预修正频率，以减少不必要的 CPU

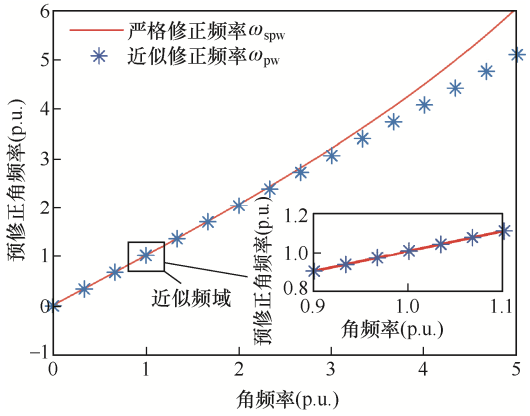


图 5 预修正频率的线性近似

Fig. 5 Linear approximation of pre-correction frequency

资源消耗。此时，将式(21)代入式(14)可得到对于谐波次数为 h，并采用改进预修正双线性变换后的 QPR 控制器离散化 z 域传递函数，其表达式为

$$\begin{aligned} G_{\mathrm{QPR}}(z) &= G_{\mathrm{QPR}}(s)\Big|_{s=\frac{\omega_{\mathrm{h}}}{\left[(k_h\omega_{\mathrm{h}}+\gamma_h)\cdot\frac{T_{\mathrm{s}}}{2}\right]}\frac{z-1}{z+1}} \\ &= \frac{a(1-z^{-2})}{1+bz^{-1}+cz^{-2}} \end{aligned} \tag{22}$$

通过分析图 4 所示的 QPR 频域传递函数可知，调节积分增益 K_{i} 虽然可使一定带宽范围内的频率信号具有足够高的稳态增益，但当为了满足数字化转换精度及系统稳定性的要求而选择截止频率 ω_{c} 和积分增益 K_{i} 的较小值时，谐波频率可能超过高增益频带范围，导致电流内环谐波抑制能力变差，使得充电桩内大量谐波注入电网。因此，需要考虑实际运行过程中缓慢波动的电网基波频率(谐波频率随之缓慢变化)。本文采用锁相环技术实时检测系统的基波频率 f_0，固定采样点数 N 后，可得采样周期为 $T_{\mathrm{s}}=1/(Nf_0)$，此时系数 d_h 可近似改写为

$$d_h = \frac{N\omega_{\mathrm{h}}}{n\pi k_h} = \frac{N\omega_0}{\pi k_h} \tag{23}$$

通过上述推导可以得到差分方程及其系数最终表达式为

$$\begin{cases} y(k) = a[e(k)-e(k-2)] - by(k-1) - cy(k-2) \\ a = \dfrac{2K_{\mathrm{i}}\dfrac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}\dfrac{\pi k_h}{N}}{1+2\dfrac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}\dfrac{\pi k_{\mathrm{h}}}{N}+(n\pi k_{\mathrm{h}}/N)^2} \\ b = \dfrac{2[(n\pi k_h/N)^2-1]}{1+2\cdot(\pi k_h/N)\cdot\dfrac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}+(n\pi k_h/N)^2} \\ c = \dfrac{1-2\cdot(\pi k_h/N)\cdot\dfrac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}+(n\pi k_h/N)^2}{1+2\cdot(\pi k_h/N)\cdot\dfrac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}+(n\pi k_h/N)^2} \end{cases} \tag{24}$$

可见，所提具有频率自适应能力的准比例谐振 FA-QPR(frequency-adaptive quasi-proportional-resonant)控制器差分方程中的系数为

$$k_{\mathrm{c}} = \frac{\omega_{\mathrm{c}}}{\omega_0}\Big|_{\omega_0=2\pi f_0}$$

$$\begin{cases} a_n = \dfrac{2K_{\mathrm{i}}k_{\mathrm{c}}(\pi k_h/N)}{1+2k_{\mathrm{c}}(\pi k_h/N)+(n\pi k_h/N)^2} \\ b_n = \dfrac{2[(n\pi k_h/N)^2-1]}{1+2\cdot(\pi k_h/N)\cdot k_{\mathrm{c}}+(n\pi k_h/N)^2} \\ c_n = \dfrac{1-2\cdot(\pi k_h/N)\cdot k_{\mathrm{c}}+(n\pi k_h/N)^2}{1+2\cdot(\pi k_h/N)\cdot k_{\mathrm{c}}+(n\pi k_h/N)^2} \end{cases} \tag{25}$$

式(25)中未包含电网额定频率 f_0，表明其不受电网频率缓慢波动的影响，且总在 n 次谐波处具有较高增益。同时线性近似的简化操作大大降低了传统频率预修正方法的计算负担，更适合工程应用的推广。

根据上述分析，可得本文所提 LVSM 控制策略框图如图 6 所示，当电网频率出现波动而偏离基频时，有功控制回路中的阻尼部分使得虚拟角频率随之缓慢变化，频率调节部分则主动调节充电桩的输出功率。与传统整流技术相比，所提 LVSM 控制策略与电网之间进行的友好交互能够实现良好的“供-需”平衡，抑制功率扰动时还能提供惯性支撑，同时将充电桩负荷赋予自适应性能更进一步地提升负荷响应过程中的电能质量，有助于电网的稳定运行。

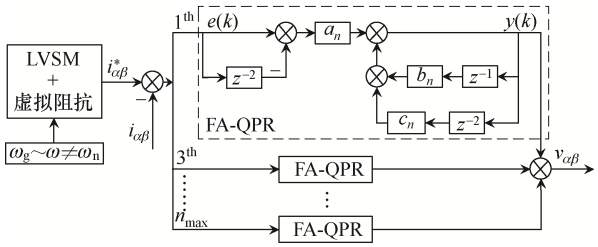


图 6　*αβ* 坐标系下所提频率自适应准 PR 控制框图

Fig. 6 Block diagram of proposed FA-QPR control in *αβ* coordinate system

4　仿真与实验结果分析

基于 MATLAB/Simulink 建立了充电桩前级三相升压型整流器模型，仿真电路如图 1 所示，具体仿真参数见表 1。首先验证所提 LVSM 控制策略的正确性，对三相整流器的稳态输出响应、功率支撑

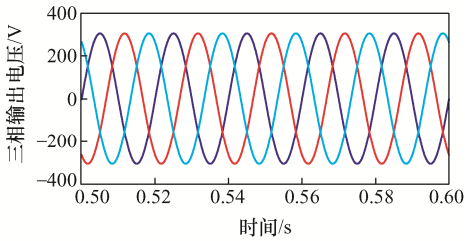
及频率响应能力进行仿真实验。其次，为了验证内部电能质量控制环在所提 LVSM 策略下的优越性，将所提方法与传统基于 PI 与电压前馈的整流控制策略(以下简称传统整流策略，内部电流环 PI 比例系数为 9.6，积分系数为 22.5)进行对比仿真实验，2 种对比策略均基于表 1 统一的电路硬件参数和相同的非理想型电网环境。此外，2 种对比策略下的直流链电压控制部分均采用 PI 控制以增强对比公平性，其中传统整流策略下的控制参数为：K_{PV}=0.2、K_{IV}=20；所提 LVSM 策略下的 PI 控制参数为：K_{PV}=0.5、K_{IV}=50。

表 1 仿真与实验参数

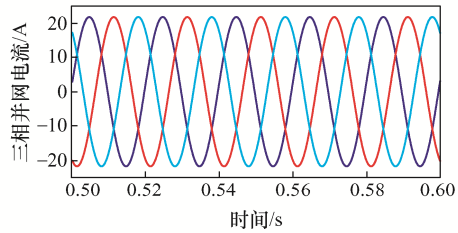
Tab. 1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
直流链电压 U_{dcref}/V	700
交流侧电压 U_{abc}/V	220
滤波电感 L_f/mH	3
直流侧电容 C_f/μF	5 000
电感等效电阻 R_L/Ω	0.012
额定频率 f_0/Hz	50
采样周期 T_s/μs	9.76
直流链 PI 比例系数	0.5
直流链 PI 积分系数	5
惯性系数 J	0.017
阻尼系数 D_p	6
频率调节系数 K_ω	−1 089
比例系数 K_i	3
控制带宽 ω_c	6.28

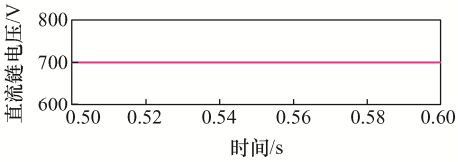
图 7 为清洁电网电压下充电桩前级整流器三相输出电压、三相并网电流和输出直流链电压仿真波形。可以看出，理想并网条件下应用所提 LVSM 控制策略能实现直流链电压稳定跟踪并获得高质量输出，且并网电流谐波含量低。



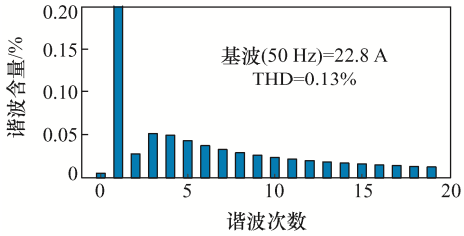
(a) 三相输出电压



(b) 三相并网电流



(c) 直流链电压

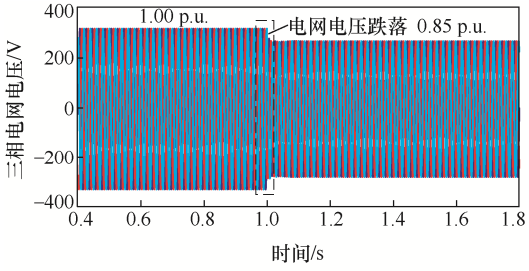


(d) A相并网电流谐波含量

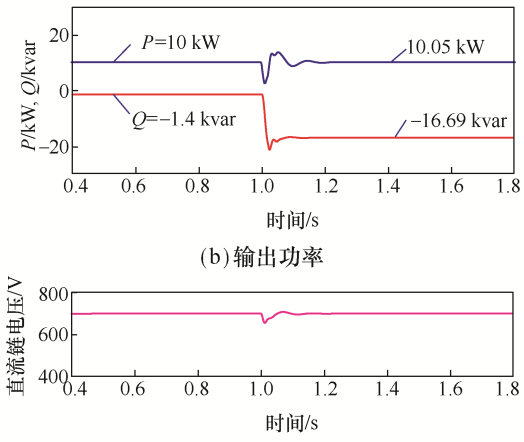
图 7 清洁电网电压下所提控制策略仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms under proposed control strategy with clean grid voltage

图 8 为电网电压跌落时本文所提 LVSM 控制策略下的仿真输出波形。从图 8(a)和(b)可以看到，t=1 s 时电网电压发生幅值跌落，由 1.00 p.u.跌落至 0.85 p.u.，此时充电桩为了响应电网的无功缺额，实时调整输出功率以主动提供支撑功能，即增大向电网输出的无功功率至 16.69 kvar。图 8(c)所示的直流链电压经过短暂的调节后也恢复到了稳态值。图 9 为电网电压骤升时本文所提 LVSM 控制策略下的仿真输出波形。可以看出，网侧电压骤升 0.15 p.u.后，所提 LVSM 策略也能迅速增加线路消耗的无功功率来平抑波动，使直流链电压快速稳定在用户设定值。



(a) 输出电压

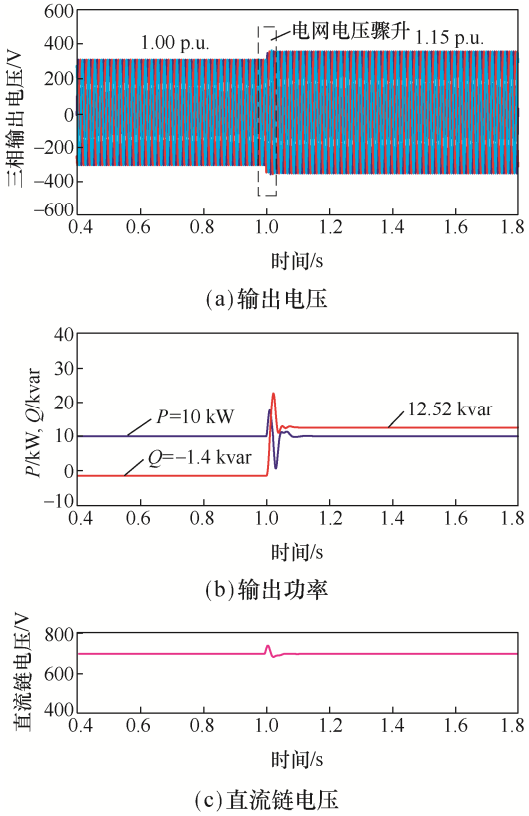


(b)输出功率

(c)直流链电压

图 8　电网电压跌落时所提控制策略仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms under proposed control strategy with grid voltage drops



(a)输出电压

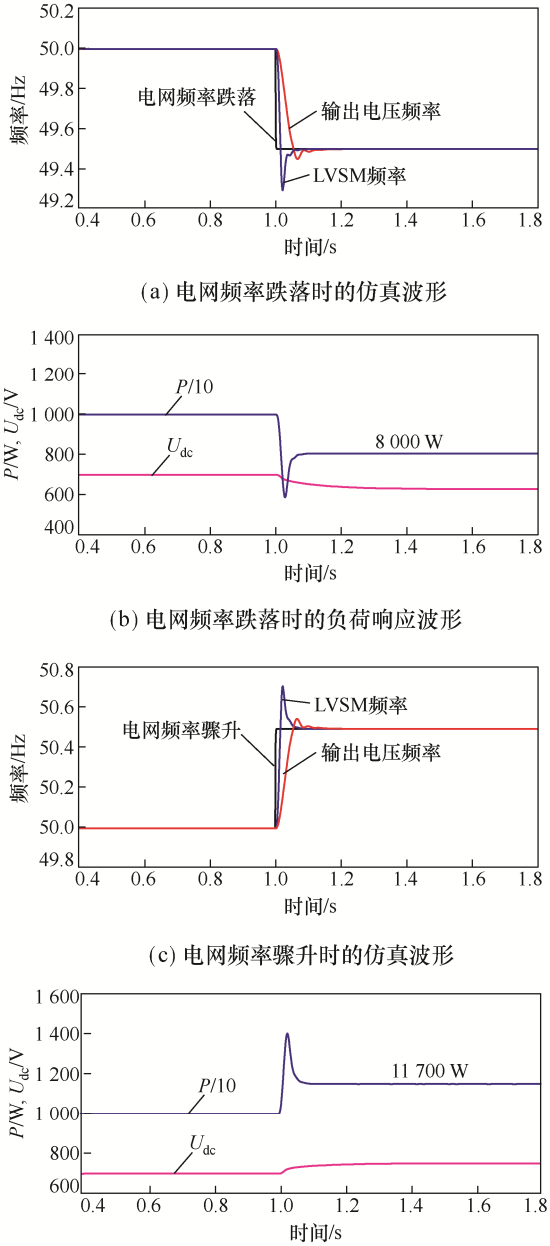
(b)输出功率

(c)直流链电压

图 9　电网电压骤升时所提控制策略仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms under proposed control strategy with grid voltage rises

此外，电力系统的频率偏差在小容量系统中通常限值为±0.5 Hz，t=1 s 时电网频率波动后整流系统在所提控制策略下的输出波形如图 10 所示。当电网频率跌落发生时，所提 LVSM 策略中的有功环路首先进行响应，如图 10(a)和(b)所示。控制系统首先调整虚拟角频率对网侧频率进行跟随，包含的惯性及阻尼环节能使系统输出电压频率较为缓慢地跌落，阻止系统频率出现“雪崩”效应。同时，整流器吸收的有功功率在所提 LVSM 控制策略下也会随频率跌落量进行主动调整，进行降功率运行。相应地，电网有功功率过剩导致母线频率骤升



(a) 电网频率跌落时的仿真波形

(b) 电网频率跌落时的负荷响应波形

(c) 电网频率骤升时的仿真波形

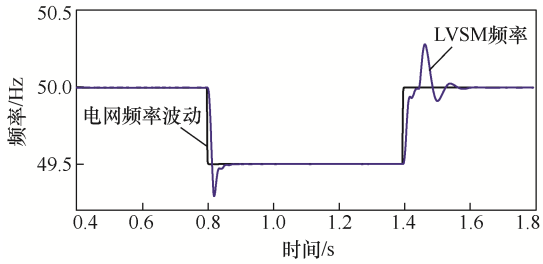
(d) 电网频率骤升时的负荷响应波形

图 10　电网频率波动时所提控制策略下的仿真波形

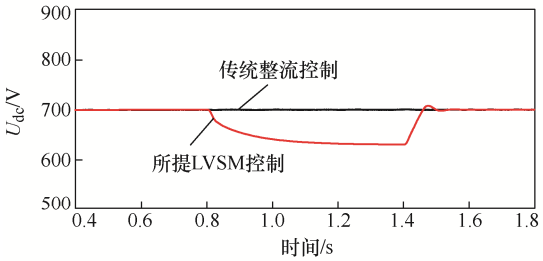
Fig. 10 Simulation waveforms under proposed control strategy with grid frequency fluctuations

时，充电桩整流器消耗的有功功率也可以主动进行抬升，以维持直流链电压稳定，如图 10(c)和(d)所示。

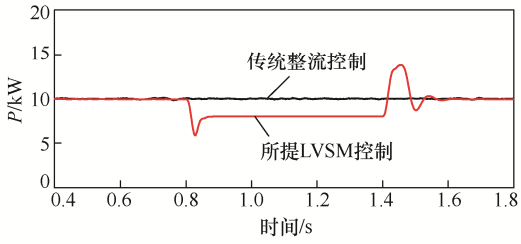
当电动汽车充电桩参与 G2V 服务时，实际的电网频率可能发生如图11(a)所示 t=0.8 s 时的电网频率跌落事件，最低以 49.5 Hz 运行，证明此时电网有功功率不足，需要减少充电桩负荷功率来维持系统功率平衡。根据图 11(b)和(c)可知，在所提 LVSM 策略下充电桩可以根据电网频率的跌落对负荷功率进行“降功率”运行，以支撑电网平稳度过跌落事件，充电桩整流器中的直流侧电压也将随着充电负荷功率的减少而下降，进一步凸显了所提策略在电网频率波动期间的功率调整灵活性。但传统整流控制策略下的充电桩功率和直流侧电压均未对系统频率的跌落进行任何响应，需要人为采取“切负荷”的措施来维持系统稳定，表明其不具备主动故障穿越的能力。此外，频率波动时传统整流控制与所提 LVSM 控制策略下并网电流的 THD 如图 11(d)所示。可以看出，在 t=0.8 s 遭遇电网跌落后，传统整流控制策略下充电桩并网电流 THD 超出 5%的国标要求，且故障期间并未作出任何响应。而本文所提 LVSM 控制策略下的充电桩并网电流 THD 在跌落瞬间出现波动后能自适应变化的电网频率，主动恢复至较低畸变值，在降功率运行期间也能提供高电能质量输出。



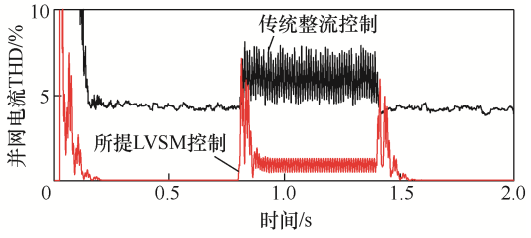
(a) 电网频率波动时的仿真波形



(b) 电网频率波动时的直流链电压波形



(c) 电网频率波动时的有功功率波形

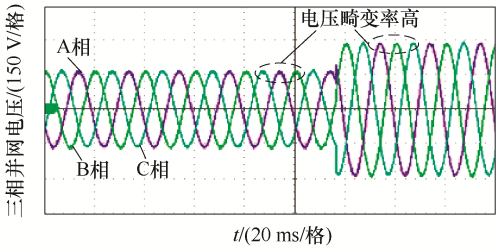


(d) 电网频率波动时的并网电流THD波形

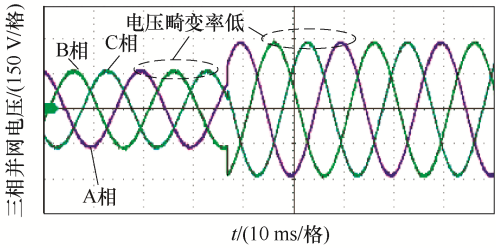
图 11 电网频率波动时不同控制策略下的仿真波形

Fig. 11 Simulation waveforms under different control strategies with grid frequency fluctuations

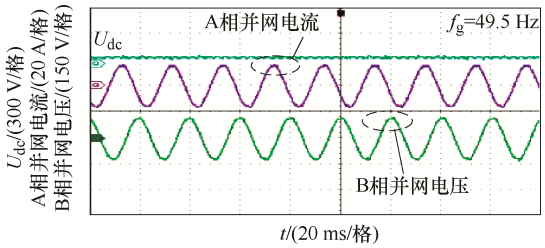
此外，为了进一步验证所提策略在实际应用中的效果，采用 TI 公司的 TMS320F28335 作为主控芯片在 RT-LAB 环境中对充电桩整流器进行了实验测试。图 12 给出了传统整流控制策略和所提 LVSM 调制策略下充电桩整流器的单相输出波形。可以看出，所提 LVSM 调制策略在电网电压骤升时，可以维持并网点处的稳定。当电网频率跌落至 49.5 Hz 并重新达到稳态时，所提 LVSM 策略下的直流链电压降至 500 V 以适应电网功率缺额，同时



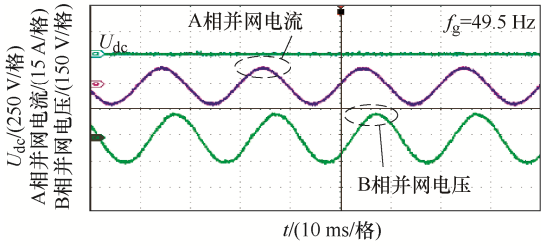
(a) 电网电压骤升下传统整流控制策略



(b) 电网电压骤升下所提LVSM控制策略



(c) 电网频率跌落下传统整流控制策略



(d) 电网频率跌落下所提LVSM控制策略

图 12　非理想型电网环境下充电桩整流器的实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms of charging pile rectifier in non-ideal power grid environment

各相电压电流波形畸变程度在 LVSM 基于频率自适应准比例谐振的电流内环控制策略下被有效降低，证明所提 LVSM 策略在非理想型电网环境下可以获得更高的并网电能质量。

5　结语

高渗透率的充电桩站接入配电网导致系统惯量降低，传统整流控制策略在配网工况波动复杂时表现不佳。一方面，当配网频率大幅偏移时，本文所提基于LVSM的主动功率响应可以较好平衡“网-荷”之间的能量交换，有利于充电桩站的友好型并网。另一方面，所提具有频率自适应能力的准比例谐振电流内环控制器计算负担低，在配网频率波动期间仍能维持较低的谐波畸变率，显著提升并网电流的电能质量，有利于电动汽车充电桩的推广应用。

参考文献：

[1] 王晖南, 王昱瑾. 基于扰动观测器和鲁棒模型预测的电动汽车集群调频方法研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 220-229.
Wang Huinan, Wang Yujin. Frequency regulation method for electric vehicles cluster based on disturbance observer and robust model prediction [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 220-229. (in Chinese)

[2] 李靖璇, 鲁岩松, 朱翀, 等. 基于预测控制的电动汽车快充模块热管理策略[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 240-246.
Li Jingxuan, Lu Yansong, Zhu Chong, et al. Thermal management strategy for electric vehicle fast charging module based on predictive control [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 240-246. (in Chinese)

[3] 徐菘, 杨博, 刘浩, 等. 一种提高虚拟同步机电流质量的电压-电流级联闭环控制方案[J]. 电工技术学报, 2024, 39(6): 1871-1885.
Xu Song, Yang Bo, Liu Hao, et al. A cascaded harmonic voltage and current closed-loop control method to improve the current quality of virtual synchronous generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1871-1885. (in Chinese)

[4] 施兴烨, 柯松, 张帆, 等. 考虑充电站可调潜力的虚拟惯性功率补偿控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 73-81.
Shi Xingye, Ke Song, Zhang Fan, et al. Virtual inertial power compensation control strategy considering the adjustable potential of charging station [J]. Power System Automation, 2024, 48(3): 73-81. (in Chinese)

[5] 李颖, 鲍一鸣, 田雨, 等. 基于VSG的低压柔性直流系统连接串联补偿电网的稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(10): 51-59, 68.
Li Ying, Bao Yiming, Tian Yu, et al. Stability analysis of VSG-based low voltage flexible DC system connected to series compensation grid [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 51-59, 68. (in Chinese)

[6] 芮月晨, 肖国春, 何玉瑞, 等. 基于虚拟电阻的电动汽车负荷虚拟同步机调频性能优化策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 210-217.
Rui Yuechen, Xiao Guochun, He Yurui, et al. Optimization strategy of frequency regulation performance of load-side virtual synchronous machine for electric vehicle based on virtual resistance [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 210-217. (in Chinese)

[7] 苏粟, 李家浩, 李泽宁, 等. 考虑用户需求的电动汽车虚拟同步机辅助调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 40-47.

Su Su, Li Jiahao, Li Zening, et al. Auxiliary frequency regulation control strategy based on virtual synchronous machine for electric vehicles considering user demand [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 40-47. (in Chinese)

[8] 邱存勇, 宋佳, 宋海亮, 等. 基于改进VSG技术双向充电桩控制策略研究[J]. 电源技术, 2021, 45(7): 936-940.
Qiu Cunyong, Song Jia, Song Hailiang, et al. Research on control strategy of bidirectional charging pile based on improved VSG technology [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(7): 936-940. (in Chinese)

[9] 李秉宇, 杜旭浩, 曾四鸣, 等. 电动汽车负荷虚拟同步机参与电网频率调节的充放电策略与实现[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(6): 11-21.
Li Bingyu, Du Xuhao, Zeng Siming, et al. Charge and discharge strategy based on load-side virtual synchronous machine for electric vehicles participating in grid frequency regulation and its realization [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(6): 11-21. (in Chinese)

[10] 龚仁喜, 顾佳宇. 负荷虚拟同步机惯性与阻尼自适应控制策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(3): 130-135.
Gong Renxi, Gu Jiayu. Adaptive control strategy of inertia and damping for load virtual synchronous machine [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3): 130-135. (in Chinese)

[11] 徐海亮, 廖自力, 贺益康. 比例-谐振控制器在 PWM 变换器应用中的几个要点[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 151-159.
Xu Hailiang, Liao Zili, He Yikang. Key points of proportional-resonant controller applied for PWM converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 151-159. (in Chinese)

[12] 杨奇, 朱靖, 王生东, 等. ISOP 并网逆变器谐振环节频率自适应控制[J]. 电力电子技术, 2022, 56(8): 36-40.
Yang Qi, Zhu Jing, Wang Shengdong, et al. Frequency-adaptive control of resonant link in ISOP grid-connected inverter [J]. Power Electronics, 2022, 56(8): 36-40. (in Chinese)

[13] 吴鹏, 黄付刚, 朱鑫彤. 基于谐振变换器的自适应窄频率范围变频与定频混合调制策略[J]. 现代电子技术, 2023, 46(16): 29-38.
Wu Peng, Huang Fugang, Zhu Xintong. Adaptive narrow frequency range variable-frequency and fixed-frequency hybrid modulation strategy based on resonant converter [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(16): 29-38. (in Chinese)

[14] 徐菁涛, 许国, 孙尧, 等. 耦合电感集成型谐振变换器及其自适应频率控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(4): 998-1009.
Xu Jingtao, Xu Guo, Sun Yao, et al. Coupled inductor integrated resonant converter with adaptive frequency control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(4): 998-1009. (in Chinese)

[15] 白正杨, 甄少伟, 胡怀志, 等. 基于自适应频率 DPWM 的数字控制 Buck 变换器[J]. 微电子学, 2021, 51(6): 860.
Bai Zhengyang, Zhen Shaowei, Hu Huaizhi, et al. A digital control Buck converter based on adaptive frequency DPWM [J]. Microelectronics, 2021, 51(6): 860. (in Chinese)

[16] 应戍狄, 陈晓英, 陈海军. 基于模糊自适应的新型单相锁相环研究[J]. 电气应用, 2016, 35 (14): 43-47.
Ying Shudi, Chen Xiaoying, Chen Haijun. Research on a new single-phase PLL based on fuzzy self-adaptation [J]. Electrotechnical Application, 2016, 35(14): 43-47. (in Chinese)

[17] 杨仁增, 张良, 李鑫海, 等. 弱电网条件下的单相频率自适应锁相环[J]. 机械与电子, 2021, 39(9): 12-15.
Yang Renzeng, Zhang Liang, Li Xinhai, et al. Frequency adaptive single phase grid synchronization in weak grid condition [J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(9): 12-15. (in Chinese)

[18] 陈荣, 刘超. 基于改进型二阶广义积分器的单相锁相环设计[J]. 自动化仪表, 2020, 41(4): 51-55, 67.
Chen Rong, Liu Chao. Design of single-phase phase-locked loop based on improved second-order generalized integrator [J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(4): 51-55, 67. (in Chinese)

[19] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 基于交叉解耦双复系数滤波器的频率自适应锁相环[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 25-31.

Wang Jiahao, Pan Huan, Na Chunning. Frequency adaptive phase-locked loop based on crossing-decoupling double complex coefficient filter [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 25-31. (in Chinese)

[20] 罗韡, 姜建国, 周中正. 基于频率自适应改进型梳状滤波器的并网锁相环技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 97-104.
Luo Wei, Jiang Jianguo, Zhou Zhongzheng. Grid-connected phase-locked loop based on frequency adaptive improved comb filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 97-104. (in Chinese)

[21] Liu Jia, Miura Y, Ise T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.

[22] Hu Wenqiang, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, et al. Dynamic analysis and parameters design of the load virtual synchronous machine [C]// 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR, USA, 2018: 1-5.

[23] Wu Heng, Ruan Xinbo, Yang Dongsheng, et al. Small-signal modeling and parameters design for virtual synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4292-4303.



吕志鹏

作者简介：

吕志鹏(1984—)，男，博士，教授级高工。研究方向：配网电力电子，智能配电网与新能源并网控制。E-mail：dkylzp@126.com。

李立生(1973—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统。E-mail：lilisheng@sd.sgcc.com。

宋振浩(1989—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统，新型配网技术。E-mail：songzhenhao@epri.sgcc.com.cn。

杨飞(1997—)，男，硕士，工程师。研究方向：配电网电力电子，新能源稳定并网运行与控制。E-mail：dky_yf@163.com。

王自力(1993—)，男，中国电源学会学生会员，博士，讲师。研究方向：新能源分布式发电，微电网运行与控制。Email：ziliwang@hnu.edu.cn。

陈燕东(1979—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电系统建模与控制，微电网技术，特种电源技术。Email：yandong_chen@hnu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)