DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.163 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

PQ扰动型电网阻抗估计方法的误差分析与改进策略

凌子涵(中国电源学会学生会员)，许津铭(中国电源学会高级会员)，
宗 林(中国电源学会学生会员)，刁韩旭(中国电源学会学生会员)，
谢少军(中国电源学会高级会员)
(南京航空航天大学自动化学院，南京 211106)

摘要：电网阻抗对并网逆变器稳定性存在严重影响，准确的电网阻抗估计有助于实现弱电网下并网逆变器高性能自适应控制。PQ扰动法是1种典型电网阻抗在线估计方法，但是，研究表明，电网阻抗真实值与估计值之间存在非线性函数关系，影响电网阻抗估计结果。传统PQ扰动法由于忽略了扰动前后稳态工作点变化的影响，在电网阻抗估计准确度方面存在不足。因此，从固定相角差的误差补偿和基于离线查表的估计值修正2个角度出发，分别提出2种计及工作点变化的改进方案，实现弱电网下电网阻抗的准确估计。详细理论分析和测试结果表明，所提电网阻抗估计方法较传统PQ扰动法在电网阻抗估计准确度方面有较大提升。

关键词：并网逆变器；弱电网；电网阻抗估计；锁相环

Error Analysis and Improvement Strategy for Grid Impedance Estimation Method Based on PQ Variation

LING Zihan, *Student Member*, *CPSS*, XU Jinming, *Senior Member*, *CPSS*, ZONG Lin, *Student Member*, *CPSS*, DIAO Hanxu, *Student Member*, *CPSS*, XIE Shaojun, *Senior Member*, *CPSS*
(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The grid impedance exerts a serious impact on the stability of grid-tied inverters, and its accurate estimation is conducive to realizing the high-performance adaptive control of grid-tied inverters in weak grid conditions. The PQ variation method is a typical method of online grid impedance estimation. However, research shows that there exists a relationship of nonlinear function between real grid impedances and their estimation results, which may affect the estimation results. The traditional PQ variation method has shortcomings in the grid impedance estimation accuracy due to ignoring the influence of steady-state operating point fluctuations before and after the variation. Therefore, from the two aspects of error compensation with fixed phase-angle difference and estimation value correction with offline look-up table, two improved estimation schemes considering the operating point fluctuations are proposed respectively to achieve an accurate grid impedance estimation under weak grid conditions. The detailed theoretical analysis and test results show that compared with the traditional PQ variation method, the proposed grid impedance estimation method can achieve a higher degree of accuracy.

Keywords: Grid-tied inverter; weak grid; grid impedance estimation; phase-locked loop

收稿日期：2024-03-22；**修回日期**：2024-05-07，2024-06-07；
录用日期：2024-06-18；**网络首发日期**：2024-07-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52277184)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52277184

随着新能源发电技术的不断发展和推广，分布式发电系统成为近年的研究热点。并网逆变器GTI(grid-tied inverter)是连接新能源分布式发电和电网之间的关键装置[1]。然而，随着新能源渗透率

的持续提高，在逆变器与电网的公共耦合点PCC(point of common coupling)处存在较大的电网阻抗，电网阻抗对系统稳定性的影响不可忽略，严重时甚至可能导致系统失稳[2-3]。因此，为确保弱电网下并网逆变器稳定运行，需要 1 种准确的电网阻抗在线测量技术[4-5]，以指导并网逆变器的稳定性分析和控制器参数设计。

在新能源变流器产品相关工程实践中，为实现逆变器在弱电网/极弱电网下的稳定运行，通常需要快速和准确地获取电网阻抗，以实时调整控制参数、满足自适应控制的需求[6-7]。早期一些离线测量技术研究已经不再适用，阻抗在线测量可以在逆变器启动并网或低功率运行阶段使能。目前电网阻抗在线测量主要包括主动和被动测量方法[4-5]。相较于被动方法，主动方法由于其简单快速、可实时触发测量而受到研究人员的青睐。典型电网阻抗主动估计方法有单次谐波注入法[6]、宽频信号注入法[8-9]、PQ扰动法[10-12]等。考虑到当前并网逆变器的稳定性问题存在于宽频带范围，文献提出了如脉冲信号注入[8]、最大长度二进制序列[9]等宽频阻抗测量方法。然而，宽频阻抗测量在信号生成和处理方面更为复杂，且在测量中注入了多个频段的能量，加大了对电网的污染程度。相比而言，PQ 扰动法在测量期间主动注入有功或无功电流分量，通过扰动前后电网阻抗上的电压波动间接估计电网阻抗，几乎不影响入网电流质量，在实际工程应用中(如在阻感性电网条件下)具有优势。另外，在极弱电网下，包含锁相环、电压环等在内的控制环路对系统低频谐波、超/次同步频率振荡及稳定性的影响较大[13-16]，对这些环路的自适应调整可以基于所获得的电网阻抗低频甚至基频附近特性。因此，为快速获得低频电网阻抗信息，采用如 PQ 扰动法等测量方法仍有较好地应用前景。

事实上，通过单次功率扰动前后 PCC 电压和入网电流波动的向量之比就可以计算出电网的阻性分量和感性分量，但是获取扰动前后的电压、电流的交流分量幅值及相位信息并不容易，计算公式也会更为复杂。因此，在实践中[10-12]，学者分别对逆变器有功/无功进行扰动，计算扰动前后电压、电流 dq 轴变化量的比值即可分别得到电网阻抗感性和阻性分量估计结果，计算仅涉及加减乘除，简单易行。然而，并网逆变器稳态工作点与电网阻抗、入网电流是相关的，有功和无功电流的变化、不同电网阻抗及电网电压条件都会直接影响到锁相环 PLL(phase-locked loop)的输出相角和电网电压相角差值[17]，并进一步影响逆变器的稳态工作特性。目前大部分研究仅针对电网阻抗测量方法层面，忽略了其对逆变器稳态工作点的影响。

本文通过详细理论分析指出，传统 PQ 扰动法尤其在弱电网条件下可能会导致较大的电网阻抗估计误差。电网阻抗与估计结果之间存在的非线性函数关系会影响阻抗测量准确性，这与已有研究存在较大区别。因此，为弥补弱电网下传统 PQ 扰动法在准确性上的不足，本文提出了基于误差补偿和修正的改进型 PQ 扰动阻抗测量方法，在不改变实际样机已配置的基于 PQ 扰动阻抗测量算法结构基础上进行改进。理论分析和实验结果验证了所提方法较传统 PQ 扰动法的优越性，在不同电网条件下均可以保持较低的估计误差。

1 传统 PQ 扰动法估计方案及其不足

1.1 并网逆变器控制结构

图 1 为并网逆变器主电路结构和基于 PQ 扰动的电网阻抗估计方法示意图。U_{dc} 为直流侧电压，C_{dc} 为直流侧电容，i_{g} 为入网电流，LC 滤波器由逆变器侧电感 L_{f} 和滤波电容 C_{f} 组成，采样三相逆变器侧电感电流 i_{L_1} 和 PCC 电压 u_{PCC} 作为逆变器控制和电网阻抗估计算法的输入。θ_{pll} 是 PLL 输出相角，并为电流控制提供 dq 控制下的角度，$i_{d\mathrm{ref}}$ 和 $i_{q\mathrm{ref}}$ 分别为入网电流 dq 基准值。电网等效为电压源 u_{s} 和电网阻抗的串联。电网阻抗由阻性分量 R_{g} 和感性分量 L_{g} 构成。

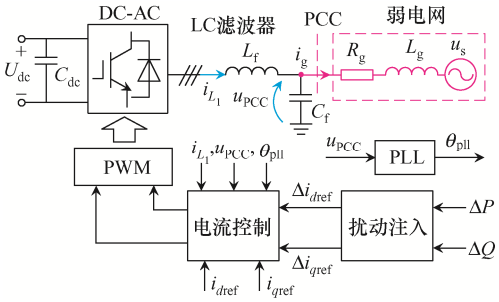


图 1　三相并网逆变器控制结构

Fig. 1 Structure of control of three-phase grid-tied inverter

一般根据短路容量比 SCR(short circuit ratio)描述电网强弱，可表示为

$$R_{\mathrm{SC}}=\frac{U_{\mathrm{s}}}{I_{\mathrm{g}}|Z_{\mathrm{g}}|}=\frac{U_{\mathrm{s}}}{I_g\sqrt{(\omega_0 L_{\mathrm{g}})^2+R_{\mathrm{g}}^2}} \tag{1}$$

式中：U_{s}为电网电压幅值；I_{g}为入网电流幅值；Z_{g}为电网阻抗幅值；ω_0为电网基波角频率，ω_0=100π rad/s。

图 2 为基于同步旋转坐标系 SRF(synchronous reference frame)的锁相环结构。图中：$k_{\mathrm{p,pll}}$和$k_{\mathrm{i,pll}}$分别为锁相环 PI 控制器的比例增益和积分增益；ω_{pll}为由 PLL 估计的角频率；θ_{pll}为 PLL 输出相角；δ 为 PLL 输出相角与电网电压相角的差值；$\Delta\omega$ 为 PLL 输出角频率与电网角频率的差值；u_d、u_q分别为 PCC 点电压的 dq 轴分量；s 为拉普拉斯算子。

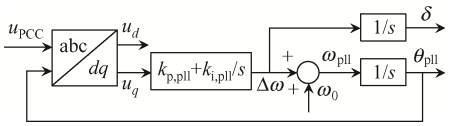


图 2　SRF-PLL 的结构

Fig. 2 Structure of SRF-PLL

1.2　传统 PQ 扰动法测量结果

传统 PQ 扰动法在有功和无功功率基准中分别加入 1 个扰动值ΔP和ΔQ，计算得到有功和无功电流扰动量$\Delta i_{d\mathrm{ref}}$和$\Delta i_{q\mathrm{ref}}$，并将其叠加在电流控制基准上，最后通过扰动前后的u_{PCC}和i_{g}信息实现电网阻抗的估计，实现方法[11]如下：

(1)$t\in[t_0, t_1]$，GTI 稳定运行，记录初始稳态工作点 1(OP1)的信息，包括u_{PCC}的 dq 分量u_{d1}和u_{q1}，以及入网电流 dq 分量i_{d1}和i_{q1}；

(2)$t\in(t_1, t_2]$，有功基准$i_{d\mathrm{ref}}$减小$\Delta i_{d\mathrm{ref}}$，无功基准$i_{q\mathrm{ref}}$不变，记录有功扰动后的稳态工作点 2(OP2)的信息，包括u_{PCC}的 dq 分量u_{d2}和u_{q2}，以及i_{g}的 dq 分量i_{d2}和i_{q2}；

(3)$t\in(t_2, t_3]$，无功基准$i_{q\mathrm{ref}}$增加$\Delta i_{q\mathrm{ref}}$，有功基准$i_{d\mathrm{ref}}$不变，记录无功扰动后的稳态工作点 3(OP3)的信息，包括u_{PCC}的 dq 分量u_{d3}和u_{q3}，以及i_{g}的 dq 分量i_{d3}和i_{q3}；

(4)$t>t_3$，PQ 扰动法测量结束，工作点返回 OP1。

需要指出的是，以上不同工作点的 $\boldsymbol{u}_d$、$\boldsymbol{u}_q$ 及 $\boldsymbol{i}_d$、$\boldsymbol{i}_q$ 均是在统一的旋转坐标系，即锁相环输出角度 θ_{pll} 定向的坐标系下获得的，如图 3 所示，δ_0为θ_{pll}与电网电压相角的稳态差值。PCC 电压u_{PCC}在稳态下满足θ_{PCC}=θ_{pll}，且u_{PCC}=u_d、u_q=0 成立。

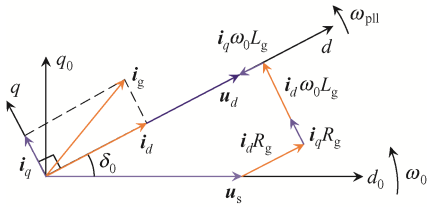


图 3　并网逆变器 PCC 电压、入网电流和电网电压之间的向量

Fig. 3 Vectors between PCC voltage, grid current and grid voltage of grid-tied inverter

传统 PQ 扰动法认为电网阻抗近似为 PCC 电压和入网电流在扰动前后的偏差量，电网阻抗估计值$Z_{\mathrm{g,est}}$可表示为

$$Z_{\mathrm{g,est}}=\frac{\Delta u_{\mathrm{PCC}}}{\Delta i_{\mathrm{g}}}=R_{\mathrm{g,est}}+\mathrm{j}\omega_0 L_{\mathrm{g,est}} \tag{2}$$

式中，$R_{\mathrm{g,est}}$和$L_{\mathrm{g,est}}$分别为电网阻抗阻性和感性分量的估计结果。

在有功扰动时，GTI 工作点从 OP1 偏移到 OP2。$R_{\mathrm{g,est}}$可以表示为

$$R_{\mathrm{g,est}}=\mathrm{Re}(Z_{\mathrm{g,est}})\big|_{\Delta Q=0}=\frac{(u_{d1}-u_{d2})(i_{d1}-i_{d2})+(u_{q1}-u_{q2})(i_{q1}-i_{q2})}{(i_{d1}-i_{d2})^2+(i_{q1}-i_{q2})^2} \tag{3}$$

类似的，在无功扰动时，工作点从OP1 偏移到 OP3，$L_{\mathrm{g,est}}$可以表示为

$$L_{\mathrm{g,est}}=\frac{1}{\omega_0}\cdot\mathrm{Im}(Z_{\mathrm{g,est}})\Big|_{\Delta P=0}=\frac{1}{\omega_0}\cdot\frac{(u_{q1}-u_{q3})(i_{d1}-i_{d3})-(u_{d1}-u_{d3})(i_{q1}-i_{q3})}{(i_{d1}-i_{d3})^2+(i_{q1}-i_{q3})^2} \tag{4}$$

考虑到仅有功扰动时，无功电流无变化，即 i_{q1}=i_{q2}；仅无功扰动时，有功电流无变化，即 i_{d1}=i_{d3}；此外，锁相环稳态下锁相准确，u_{q1}=u_{q2}=u_{q3}≈0。基于上述条件，可以得到传统 PQ 扰动法电网阻抗估计结果 $R_{\mathrm{g,est}}$ 和 $L_{\mathrm{g,est}}$ 的表达式分别为

$$\begin{cases}R_{\mathrm{g,est}}\approx\dfrac{u_{d1}-u_{d2}}{i_{d1}-i_{d2}}\\ L_{\mathrm{g,est}}\approx-\dfrac{1}{\omega_0}\cdot\dfrac{u_{d1}-u_{d3}}{i_{q1}-i_{q3}}\end{cases} \tag{5}$$

因此，根据 3 个工作点的信息，可以较简单地得到电网阻抗阻性和感性分量的估计值。

1.3 传统 PQ 扰动法的估计误差分析

需要强调的是，式(5)的估计结果并非真实电网阻抗，其并未考虑有功、无功扰动引起工作点偏移的影响。传统 PQ 扰动法仅考虑特定电网阻抗或特定电网阻抗感阻比 *X/R* 的情形，少有讨论不同 *X/R* 及宽 SCR 范围下的电网阻抗估计结果的准确性。下面将详细分析估计误差产生的原因。

根据基尔霍夫电压方程，可以得到 PCC 电压、电网电压和入网电流的向量关系为

$$u_{\mathrm{PCC}}=u_{\mathrm{s}}+Z_{\mathrm{g}}i_{\mathrm{g}} \tag{6}$$

写成向量形式为

$$U_{\mathrm{PCC}}\angle\theta_{\mathrm{PCC}}=U_{\mathrm{s}}\angle\theta_{\mathrm{s}}+Z_{\mathrm{g}}\angle\theta_{\mathrm{z}}\cdot I_{\mathrm{g}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC}}+\varphi) \tag{7}$$

式中：$U_{\mathrm{PCC}}\angle\theta_{\mathrm{PCC}}$ 为 PCC 电压向量；$U_{\mathrm{s}}\angle\theta_{\mathrm{s}}$ 为电网电压向量；$Z_{\mathrm{g}}\angle\theta_{\mathrm{z}}$ 为电网阻抗；$I_{\mathrm{g}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC}}+\varphi)$为入网电流向量；$\varphi$ 为功率因数角。

稳态下锁相准确，有 θ_{PCC}=θ_{pll}。因此，电网阻抗计算公式实际为向量形式的数学运算，即

$$Z_{\mathrm{g,est}}=\frac{U_{\mathrm{PCC1}}\angle\theta_{\mathrm{PCC1}}-U_{\mathrm{PCC2}}\angle\theta_{\mathrm{PCC2}}}{I_{\mathrm{g1}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC1}}+\varphi_1)-I_{\mathrm{g2}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC2}}+\varphi_2)}=Z_{\mathrm{g}} \tag{8}$$

式中，$U_{\mathrm{PCC1}}\angle\theta_{\mathrm{PCC1}}$、$U_{\mathrm{PCC2}}\angle\theta_{\mathrm{PCC2}}$ 分别为扰动前、后的 PCC 电压向量；$I_{\mathrm{g1}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC1}}+\varphi_1)$、$I_{\mathrm{g2}}\angle(\theta_{\mathrm{PCC2}}+\varphi_2)$为扰动前、后的入网电流向量；$\varphi_1$、$\varphi_2$ 分别为扰动前、后的电流功率因数角。

式(6)~式(8)均与锁相环角度无关，仅依赖于 PCC 电压、电网电压、入网电流之间的向量关系。本文以锁相环输出角度 θ_{pll} 定向的坐标系作为参考，经过坐标变换，在 *dq* 轴下，锁相环相关的稳态工作点信息被引入到电压和电流的 *dq* 轴关系中，结合图 3，可以得到稳态下 PCC 电压 *dq* 分量的表达式分别为

$$\begin{cases}u_d=U_{\mathrm{s}}\cos\delta_0+R_{\mathrm{g}}i_d-\omega_0L_{\mathrm{g}}i_q\\ u_q=\omega_0L_{\mathrm{g}}i_d+R_{\mathrm{g}}i_q-U_{\mathrm{s}}\sin\delta_0\end{cases} \tag{9}$$

稳态下，u_q≈0，可以得到 δ_0 的表达式。

在 PQ 扰动前后的 3 个工作点(即 OP1~OP3)处，PCC 电压 *d* 轴分量 u_{d1}、u_{d2}、u_{d3} 可以表示为

$$u_{di}=U_{\mathrm{s}}\cos\delta_{0i}+R_{\mathrm{g}}i_{di}-\omega_0L_{\mathrm{g}}i_{qi}\qquad i=1,2,3 \tag{10}$$

式中，δ_{01}、δ_{02}、δ_{03} 分别为 3 个工作点处的 PLL 输出相角与电网电压相角的差值，可表示为

$$\delta_{0i}=\arcsin\left(\frac{\omega_0L_{\mathrm{g}}i_{di}+R_{\mathrm{g}}i_{qi}}{U_{\mathrm{s}}}\right)\qquad i=1,2,3 \tag{11}$$

传统 PQ 扰动法在估计电网阻抗过程中，仅考虑了扰动前后电压、电流幅值的波动，忽略了锁相环控制坐标系相位的偏移(即 δ_{01}、δ_{02}、δ_{03})。事实上，在 PQ 扰动前后，锁相环所决定的 *dq* 轴坐标系与电网夹角并非恒定不变，因此，使用 *dq* 轴的电气量数据后，传统 PQ 扰动法的阻抗测量结果与实际值会存在偏差。

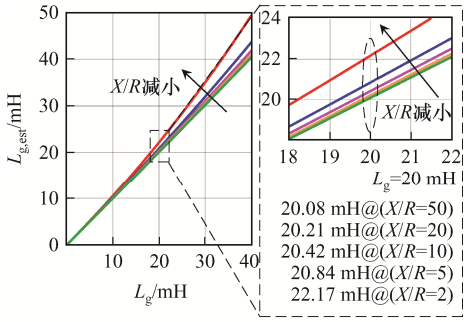
将式(10)、式(11)代入式(5)，可以得到传统 PQ 法估计值的真实表达式为

$$\begin{cases}L_{\mathrm{g,est}}=-\dfrac{1}{\omega_0}\cdot\dfrac{u_{d1}-u_{d3}}{i_{q1}-i_{q3}}=L_{\mathrm{g}}-\dfrac{U_{\mathrm{s}}(\cos\delta_{01}-\cos\delta_{03})}{\omega_0(i_{q1}-i_{q3})}\\ R_{\mathrm{g,est}}\approx\dfrac{u_{d1}-u_{d2}}{i_{d1}-i_{d2}}=R_{\mathrm{g}}+\dfrac{U_{\mathrm{s}}(\cos\delta_{01}-\cos\delta_{02})}{i_{d1}-i_{d2}}\end{cases} \tag{12}$$

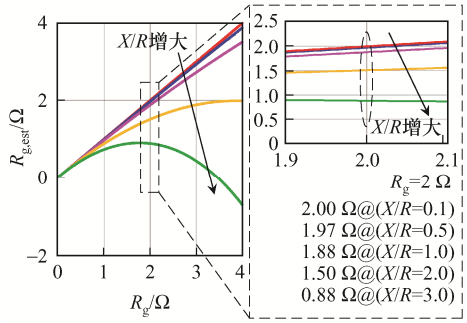
传统 PQ 扰动法未进行严格推导，其估计值与电网阻抗真实值之间存在偏差，其存在的非线性偏差项取决于 GTI 在不同稳态工作点处的值，与 PQ 扰动期间的有功无功扰动量、电网阻抗真实值和电网电压有关。通常电网电压在逆变器正常运行中不会有较大波动。此外，PQ 扰动的注入不宜选取过

大，通常不会超过运行功率的 20%，以免影响逆变器的正常运行，因此，PQ 扰动幅值对阻抗估计的影响相对较小。下面将重点分析电网阻抗对估计结果的影响。

根据式(12)，为具体说明不同 *X/R* 下传统 PQ 扰动法对阻抗估计精度的影响，图 4(a)和(b)分别给出了不同 *X/R* 下传统 PQ 扰动法估计值与电网阻抗感性和阻性分量真实值的关系。可以得到如下结论。



(a)感性分量估计值和真实值的关系



(b)阻性分量估计值和真实值的关系

图 4　不同 *X/R* 下，电网阻抗真实值和传统 PQ 扰动法估计结果的关系曲线

Fig. 4 Curves of relationship between real value of grid impedance and estimation results of traditional PQ variation method under different values of *X/R*

(1)相同 L_g 下，*X/R* 越小(即 R_g 越大)，PQ 扰动法估计值 $L_{g,est}$ 与真实值 L_g 的误差越大；同理，相同 R_g 下，*X/R* 越大(即 L_g 越大)，估计值 $R_{g,est}$ 与 R_g 的误差越大。

(2)当 L_g(或 R_g)足够小且可以忽略不计时，理论估计值 $R_{g,est}$(或 $L_{g,est}$)即为真实阻抗。

(3)当 *X/R* 较大时，$R_{g,est}$ 甚至可能出现负值，表明偏差项绝对值的影响已经超过 R_g，这显然是不合理的。

综上，$R_{g,est}$ 和 $L_{g,est}$ 的估计结果与 R_g 和 L_g 均有关，由于忽略了 GTI 扰动前后工作点的变化，越大的 R_g(或 L_g)对电网阻抗感性(或阻性)分量估计精度的影响越大。

2　所提改进电网阻抗估计方法

为补偿式(12)中变工作点引入的偏差项，本节研究了 2 种改进电网阻抗估计方法。改进方案 1：基于固定相角差的电网阻抗估计误差补偿方法；改进方案 2：基于离线查表的电网阻抗估计值修正方法。

2.1　基于固定相角差的估计误差补偿方法

为补偿相角差引入的变工作点特性的影响，最直接的办法为求解 $\cos\delta_{01}$、$\cos\delta_{02}$、$\cos\delta_{03}$，δ_{01}、δ_{02}、δ_{03} 可以通过 PLL 间接获取。通过对 PLL 的频率误差项$\Delta\omega$ 实时积分，即可得到实际需要的锁相环相角差估计值 $\delta_{0i}(i=1, 2, 3)$，即

$$\delta_{0i}=\int_0^t(\Delta\omega)\,\mathrm{d}t \qquad t\in(0,t_i] \tag{13}$$

考虑到实际数字控制中处理三角函数计算量可能较为困难，可以对余弦项进行近似处理。并网逆变器稳定运行的前提条件是 δ_{0i} 有解，即保证 $\delta_{0i}<\pi/2$。鉴于 GTI 正常稳定运行期间 δ_0 较小，权衡计算量和精度，将 $\cos(\cdot)$在 $\delta_{0i}=0$ 处泰勒展开到二次项，即 $\cos(\cdot)\approx1-0.5(\cdot)^2$。改进的电网阻抗阻性和感性分量估计值 $R_{g,modified}$ 和 $L_{g,modified}$ 分别为

$$\begin{cases}R_{g,modified}\approx R_{g,est}+\dfrac{1}{2}\dfrac{U_s(\delta_{02}^2-\delta_{01}^2)}{i_{d2}-i_{d1}}\\ L_{g,modified}\approx L_{g,est}-\dfrac{1}{2}\dfrac{U_s(\delta_{03}^2-\delta_{01}^2)}{\omega_0(i_{q3}-i_{q1})}\end{cases} \tag{14}$$

定义感性分量估计误差 Error,L_g 和阻性分量估计误差 Error,R_g 的表达式分别为

$$\begin{cases}\text{Error},L_g=\left|\dfrac{L_{g,est}-L_g}{L_g}\right|\times100\%\\ \text{Error},R_g=\left|\dfrac{R_{g,est}-R_g}{R_g}\right|\times100\%\end{cases} \tag{15}$$

图 5 为 *X/R*=2、不同 SCR 条件下，传统方法和

所提优化方法估计结果的误差曲线。传统方法的估计误差随着 SCR 的降低不断增大；所提方法显著削弱了 PQ 扰动导致工作点变化的不利影响，在宽 SCR 范围内可保持较低的估计误差。

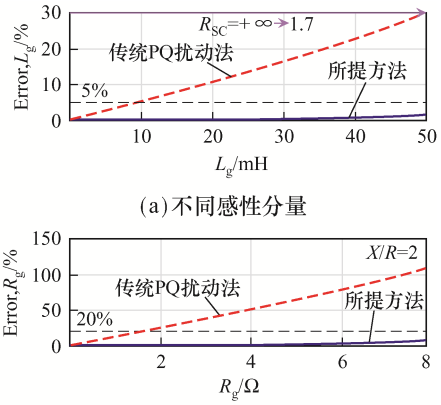


图 5 不同 SCR 条件下，传统 PQ 法和所提方法理论估计误差对比(X/R=2)

Fig. 5 Comparison of theoretical estimation error between traditional PQ method and proposed method under different values of SCR (X/R=2)

需要指出的是，电网真实频率并非恒定 50 Hz，当电网频率波动时，$\Delta\omega$ 存在一定波动，δ 可能持续增加或减小，从而导致估计不准确，这也是该方法的不足之处。此时，可以通过一些附加频率检测环节保证获得准确的信息[18]，但这也使得控制方案更为复杂。因此，该方案仅适用于电网真实频率波动较小的较理想场合。

2.2 基于离线查表的电网阻抗估计值修正方法

在工程化应用中，为最大程度减少计算量，改进后的电网阻抗估计方法可以通过离线方式完成设计，将计算结果以查询表的形式存储在程序中。借助 MATLAB，拟合传统 PQ 扰动法估计值与真实值的关系。不同感性分量估计结果 $L_{g,est}$ 下，$L_{g,est}$ 和 L_g 在特定范围内的函数关系如图 6 所示。

一次函数拟合方式可表示为

$$L_g = (0.758\,8L_{g,est} + 2.855\,0)\ \text{mH} \tag{16}$$

二次函数拟合方式可表示为

$$L_g = f(L_{g,est}) = (-0.013\,5L_{g,est}^2 + 1.168\,0L_{g,est} - 0.140\,2)\ \text{mH} \tag{17}$$

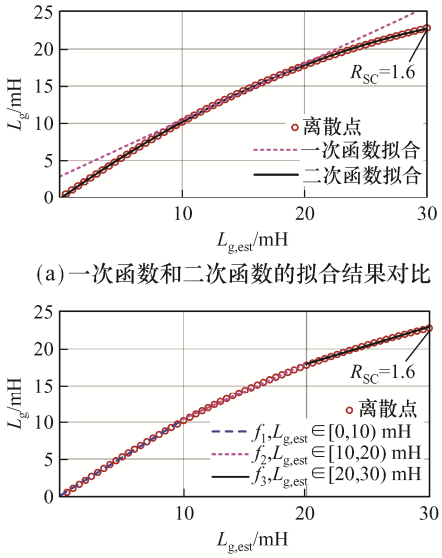


图 6 改进方案 2 的感性分量估计拟合函数关系

Fig. 6 Fitted function of inductive component estimation in second improved scheme

一次函数分段拟合方式可表示为

$$f(L_{g,est}) = \begin{cases} f_1 = (1.020L_{g,est} + 0.124)\ \text{mH} \\ \quad L_{g,est} \in [0,10)\ \text{mH} \\ f_2 = (0.759L_{g,est} + 2.860)\ \text{mH} \\ \quad L_{g,est} \in [10,20)\ \text{mH} \\ f_3 = (0.501L_{g,est} + 7.970)\ \text{mH} \\ \quad L_{g,est} \in [20,30)\ \text{mH} \end{cases} \tag{18}$$

由图 6(a)可见，在 $L_{g,est}$∈[10, 20) mH 的区间内，一次函数拟合结果(如式(16)所示)与理论值较为吻合，但在 $L_{g,est}$∈[20, 30) mH 和[0, 10) mH 的区间内，拟合结果偏离理论值，如果采用二次函数拟合(如式(17)所示)，在较宽范围内(图中强电网到极弱电网，R_{SC}≥1.6)均可保证较好的拟合度。图 6(b)在 3 个区间内，分别采用不同的一次函数拟合方式(如式(18)所示)，得到的结果较为准确，因此可以结合实际 DSP 运算量，权衡阻抗估计精度和查询表复杂度，选择不同的拟合方式。

不同阻性分量估计结果 $R_{g,est}$ 下，$R_{g,est}$ 和 R_g 在特定范围内的函数拟合关系如图 7 所示，其中 $L_{g,est}$= 15 mH。可以看出，在 R_g∈[0,5) Ω(对应实际 X/R>0.7)的较宽范围内，一次函数拟合结果和理论值较为吻合。因此，在弱电网下，可以根据传统 PQ 扰动法

的估计值代入该函数中查询修正值。

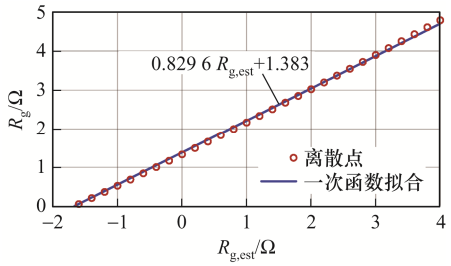


图 7　改进方案 2 的阻性分量估计拟合函数关系

Fig. 7 Fitted function of resistive component estimation in second improved scheme

2.3　所提电网阻抗估计流程

所提计及变工作点特性的 GTI 电网阻抗估计方法的实现流程如图 8 所示。对每个工作点信息(包括 PCC 电压及入网电流 *dq* 分量)进行平均滤波以减小噪声干扰。在使能电网阻抗测量后，经过 PQ 扰动注入、阻抗计算、阻抗修正 3 个环节得到改进方法的估计结果。改进方案 1 和方案 2 的流程均可参考图 8，不同之处仅在于，方案 1 需要额外记录相角差 δ_0 的 3 个工作点信息，方案 2 需要在计算阻抗修正值时查表代入计算。

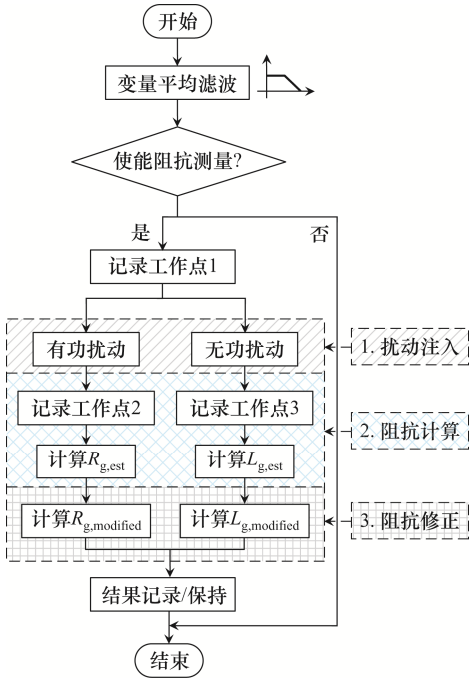


图 8　所提 GTI 电网阻抗估计方法流程

Fig. 8 Flow chart of proposed GTI grid impedance estimation method

需要指出的是，所提方法的有功、无功扰动量较小(本文设定为不高于当前输出功率的20%，且扰动持续时间较短)，在低功率运行阶段的有功、无功功率扰动对逆变器自身稳定性及对电网的影响均可忽略。尽管 GTI 重载或满载运行时，有功、无功扰动可能对电网产生一定影响，但由于所提方法所需的扰动持续时间较短，且在逆变器的额定功率传输能力范围内，本方法同样适用。综上，所提方法不仅可在光伏并网逆变器低功率缓启动阶段使能电网阻抗在线测量，还适用于被动式触发或主动式的功率扰动电网阻抗检测场景。

3　实验验证

通过远宽公司开展的硬件在环HIL(hardware-in-the-loop)实验进行实验验证。采用 Modeling Tech 公司的硬件在环实时仿真机 MT-3060 与 1 台上位机共同构成实时仿真平台，电网阻抗测量算法通过基于 DSP 的数字控制平台实现。实验参数见表 1。

表 1　硬件在环实验参数

Tab. 1 Parameters of hardware-in-the-loop experiment

参数	数值
额定功率 P_{rated}/W	700
直流侧电压 U_{dc}/V	175
电网相电压 U_s/V(RMS)	55
电网频率 ω_0/(rad·s^{-1})	100π
滤波电感 L_f/mH	1.1
滤波电容 C_f/μF	10
开关频率 f_{sw}/kHz	15
采样频率 f_s/kHz	15
PQ 扰动量ΔP/W	116
PQ 扰动量ΔQ/var	116

在 L_g=15 mH、R_g=2 Ω 时，有功、无功扰动对 GTI 工作点的影响如图 9 所示，可以看出，在有功和无功电流基准受扰后，δ_0 的稳态值有变化。传统 PQ 扰动法与改进方案 1 的对比实验结果如图 10 所示，可以看出，工作点变化带来的影响进一步影响到了电网阻抗的估计结果，电网阻抗阻性或者感性分量的估计值均与真实值存在较大误差，采用改进方案 1 后，通过补偿工作点变化引入的误差项，阻

感性估计结果均更接近真实值，验证了所提方案的有效性。

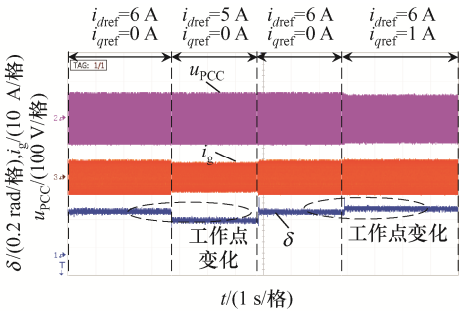
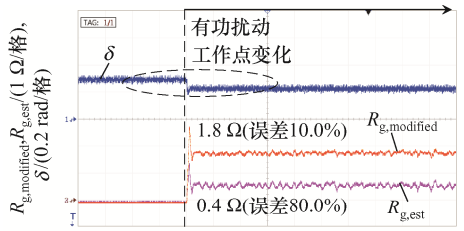


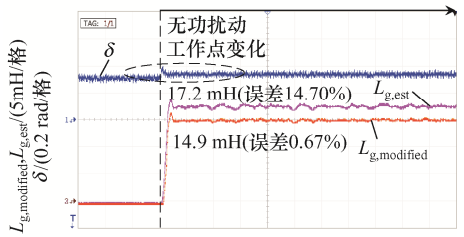
图 9 有功无功扰动对 GTI 工作点的影响

(L_g=15 mH、R_g=2 Ω)

Fig. 9 Impact of active and reactive power variations on GTI operating points (L_g=15 mH, R_g=2 Ω)



(a) 电网阻抗阻性分量估计结果



(b) 电网阻抗感性分量估计结果

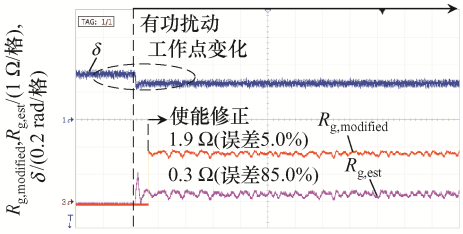
图 10 传统方法与改进方案 1 的对比实验结果

(L_g=15 mH、R_g=2 Ω)

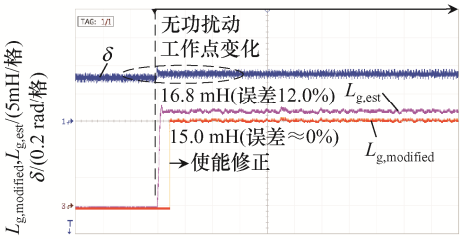
Fig. 10 Comparison of experimental results between traditional method and first improved scheme (L_g=15 mH, R_g=2 Ω)

传统 PQ 扰动法和与改进方案 2 的对比实验结果如图 11 所示。根据查询表进行修正后，估计结果接近真实值，同样验证了所提改进方案的有效性。

为验证所提方法在弱电网下的适应性，在不同 SCR 条件下选取几个点进行测试，传统 PQ 扰动法与 2 种改进方案的估计误差对比如图 12 所示。可以看出，传统 PQ 扰动法估计结果误差随 SCR 的减



(a) 电网阻抗阻性分量估计结果

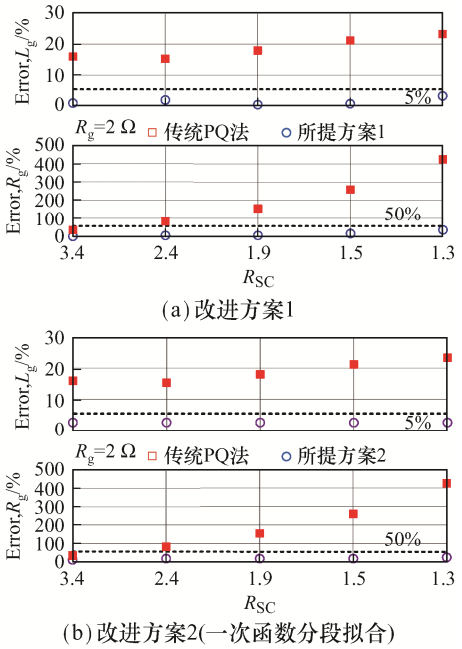


(b) 电网阻抗感性分量估计结果

图 11 传统方法与改进方案 2 的对比实验结果

(L_g=15 mH、R_g=2 Ω)

Fig. 11 Comparison of experimental results between traditional method and second improved scheme (L_g=15 mH, R_g=2 Ω)



(a) 改进方案1

(b) 改进方案2(一次函数分段拟合)

图 12 不同 SCR 条件下，传统方法和所提改进方案的估计误差对比实验结果

Fig. 12 Comparison of experimental results of estimation errors between traditional method and improved schemes proposed in this paper under different values of SCR

小而增大，2 种改进方案在极弱电网下仍能保持较低的估计误差，其电网阻抗估计准确度较传统方法

均有大幅提升，有力论证了所提方案的有效性。

4　结语

针对传统 PQ 扰动法忽略了电流基准扰动引入的稳态工作点偏移问题，本文通过详细理论推导，说明了电网阻抗估计结果会同时受到电网阻抗阻性和感性分量的影响。为此，提出了 2 种计及工作点变化的改进估计方法，为实际工程应用提供了方法指导。弱电网下的仿真表明，与传统 PQ 扰动法相比，所提优化方法显著削弱了并网逆变器变工作点特性的影响，实现了对电网阻抗阻性和感性分量的准确估计，且在不同电网短路比下估计误差均较低。需要说明的是，本文重点研究 PQ 扰动法在单机并网场景下阻抗测量的准确性，若系统中存在多台逆变器并联，多机交互特性可能影响电网阻抗估计结果，所提方法在多机场景下的适用性将在未来进一步研究。

参考文献：

[1] Blaabjerg F, Yang Yongheng, Kim K A, et al. Power electronics technology for large-scale renewable energy generation [J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(4): 335-355.

[2] 程成, 谢少军, 谭玲娟, 等. 跟网型逆变器的非线性模型及稳定性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 137-143.
Cheng Cheng, Xie Shaojun, Tan Lingjuan, et al. Nonlinear model and stability analysis method for grid-following inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 137-143. (in Chinese)

[3] 杨明, 杨倬, 李玉龙, 等. 高渗透率下基于并网逆变器阻抗重塑的锁相环设计方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 554-566.
Yang Ming, Yang Zhuo, Li Yulong, et al. A phase-locked loop design method based on impedance remodeling of grid-connected inverter under high permeability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 554-566. (in Chinese)

[4] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
Xie Shaojun, Ji Lin, Xu Jinming. Review of grid impedance estimation for gird-connected inverter [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326. (in Chinese)

[5] De Meerendre M K, Prieto-Araujo E, Ahmed K H, et al. Review of local network impedance estimation techniques [J]. IEEE Access, 2020, 8: 213647-213661.

[6] Ling Zihan, Xu Jinming, Wu Yuchen, et al. Adaptive tuning of phase-locked loop parameters for grid-connected inverters in weak grid cases [C]// 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Chengdu, China, 2021: 821-826.

[7] 唐圣德, 胡海涛, 肖冬华, 等. 基于阻抗测量信息的电气化铁路“多车共网”系统稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(19): 6039-6053.
Tang Shengde, Hu Haitao, Xiao Donghua, et al. Stability analysis of electrified railway multiple train-network system based on impedance measurement information [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(19): 6039-6053. (in Chinese)

[8] 刘自鹏, 刘增, 刘进军. 基于并网变流器的脉冲注入型电网阻抗测量方法的参数设计[J]. 电源学报, 2020, 18(2): 95-103.
Liu Zipeng, Liu Zeng, Liu Jinjun. Parameter design of impulse-injection-based grid impedance measurement method with grid-tied converter [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(2): 95-103. (in Chinese)

[9] Roinila T, Vilkko M, Sun Jian. Broadband methods for online grid impedance measurement [C]// 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, USA, 2013: 3003-3010.

[10] Ciobotaru M, Teodorescu R, Rodriguez P, et al. Online grid impedance estimation for single-phase grid-connected systems using PQ variations [C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference. Orlando, FL, USA, 2007: 2306-2312.

[11] Mohammed N, Kerekes T, Ciobotaru M. An online event-based grid impedance estimation technique using grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 6106-6117.

[12] Mohammed N, Kerekes T, Ciobotaru M. Communica-

tion-free equivalent grid impedance estimation technique for multi-inverter systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1542-1552.

[13] Xu Jinming, Zhong Jiufa, Kang Jiahua, et al. Stability analysis and robust parameter design of DC-voltage loop for three-phase grid-connected PV inverter under weak grid condition [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(4): 3776-3787.

[14] 王海宁, 陈燕东, 廖书寒, 等. 弱电网条件下考虑频率耦合的三相并网逆变器简化阻抗建模及宽频带振荡分析[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 19-29.
Wang Haining, Chen Yandong, Liao Shuhan, et al. Simplified impedance modeling and broadband oscillation analysis for three-phase grid-connected inverter considering frequency coupling under weak grid conditions [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 19-29. (in Chinese)

[15] 李苏丹, 曾成碧, 苗虹, 等. 适用于弱电网的三相并网逆变器锁相环设计[J]. 电源学报, 2023, 21(3): 27-35.
Li Sudan, Zeng Chengbi, Miao Hong, et al. Phase-locked loop design of three-phase grid-connected inverter for weak grid [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(3): 27-35. (in Chinese)

[16] 陈丽, 周永博, 李瑞琪, 等. 计及控制延迟和电网阻抗变化的并网微网内压控逆变器的被动增强控制[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 203-212.
Chen Li, Zhou Yongbo, Li Ruiqi, et al. Passive enhancement control of voltage-controlled inverters in grid-connected microgrids considering control delay and variation in grid impedance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 203-212. (in Chinese)

[17] Xu Jinming, Hu Yuan, Qian Hao, et al. Delay-based phase-locked loop parameters design based on stability region of grid-connected single-phase inverter under grid voltage sags [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11324-11334.

[18] Golestan S, Guerrero J M, Vasquez J C. An open-loop grid synchronization approach for single-phase applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5548-5555.



凌子涵

作者简介：

凌子涵(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：新能源并网逆变器稳定性分析及控制。E-mail：zhling@nuaa.edu.cn。

许津铭(1987—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：新能源并网发电技术及电力电子化电力系统。E-mail：xjinming01@163.com。

宗林(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：新能源并网逆变器稳定性分析及控制。E-mail：17312418298@163.com。

刁韩旭(2001—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：构网型变流器建模及稳定性分析。E-mail：diaohanxu@nuaa.edu.cn。

谢少军(1969—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：功率电子变换技术和航空电源系统。E-mail：eeac@nuaa.edu.cn。

(责任编辑：耿越)