doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.01.009

LCL 型光伏逆变器复合优化控制策略

李圣清，陈　文，罗朝旭，张东辉

（湖南工业大学 电气与信息工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：高阶 LCL 型光伏逆变器控制系统中，由于传统单一的比例积分（PI）和重复控制（RC）策略的并网电流控制方法虽能较好地改善并网电流质量但不能确保系统稳定性良好，输出电流会有一定的畸变。针对这一问题，提出了一种两相静止坐标系下 PI+ 重复控制的复合优化控制策略。首先，在现有的 PI+ 重复控制策略中，在 PI 控制器支路上引入加权系数 *m* 以加强 PI 环节的调节作用，并加快系统的响应速度以满足系统的动态性能；其次，在重复控制器支路上引入加权系数 *n* 以加强对系统稳态误差的不断修正并消除稳态误差，获得系统稳态性要求；最后，通过仿真试验验证了理论分析和策略优化的有效性。仿真结果表明，该优化方案简化了坐标变换与解耦计算，提高了对光伏逆变器输出的谐波抑制能力，降低了逆变器并网电流的总谐波畸变率。

关键词：光伏逆变器；复合优化控制；谐波抑制；加权系数

中图分类号：TM464　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2020)01-0051-07

引文格式：李圣清，陈　文，罗朝旭，等 . LCL 型光伏逆变器复合优化控制策略 [J]. 湖南工业大学学报，2020，34(1)：51-57.

Optimization Strategy of Compound Control Based on LCL Photovoltaic Inverters

LI Shengqing，CHEN Wen，LUO Zhaoxu，ZHANG Donghui

（College of Electrical and Information Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Due to the fact that in the traditional grid-connected current control method of single proportional integrating (PI) and repeat control (RC) strategies, a distortion problem can be found in the photovoltaic inverter output current, which fails to ensure the stability of the system, and result in a poor power quality of the grid-connected current under the control system of high-order LCL type photovoltaic inverter. In view of this problem, a compound optimal control strategy of PI+ repetitive control has thus been proposed under two-phase static coordinate system. Firstly, in the existing PI+ repetitive control strategy, the introduction of weighting coefficient *m* to the PI controller branch helps to improve the regulation function of PI link, thus accelerating the response speed of the system to meet the dynamic performance of the system. Secondly, by introducing the weighting coefficient *n* into the branch of repetitive controller, the steady-state error of the system can be continuously corrected and eliminated, so as to meet the steady-state requirements of the system. Finally, the effectiveness of theoretical analysis and strategy optimization can be verified by simulation experiments. The simulation results show that the optimization scheme simplifies the coordinate transformation and decoupling calculation, improves the harmonic suppression ability of the photovoltaic inverter

收稿日期：2019-05-28

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51977072），国家重点研发计划基金资助项目（2018YFB0606005），湖南省自然科学基金资助项目（2018JJ3129）

作者简介：李圣清（1961-），男，湖南永兴人，湖南工业大学教授，博士，主要从事电能质量调节与控制技术，微电网及电力电子系统控制技术方面的教学与研究，E-mail：lsq1961@sohu.com

output, and reduces the total harmonic distortion rate of the grid connected current of the inverter.

Keywords：photovoltaic inverter；compound optimization control；harmonic suppression；weighting factor

1 研究背景

随着能源危机与环境污染问题日益凸显[1−3]，光伏发电已成为人们广泛关注与应用的新能源之一。作为光伏发电入网的重要电力接口，并网逆变器是并网技术实现逆变器并网控制的关键切入点，也是提高电网电能质量的重要研究课题[4−6]。光伏并网逆变器作为整个光伏系统的核心，能够提升生产电能的质量和效率[7−9]，以降低入网电流总谐波失真（total harmonic distortion，THD），减少对公共电网的污染[8]。目前对于电能质量和 THD 控制方式很多[10]，其中传统的 PI 控制可实现对对象快速跟踪，但是只局限于直流对象，对于交流控制量，存在周期性信号的跟踪和扰动抑制补偿能力控制差的问题；比例谐振（proportional resonant，PR）控制虽可以实现对交流控制量的稳定跟踪，但理想的控制器比较难以实现，同时系统动态性能有待提升。为了解决上述控制策略的局限性，引入重复控制器加以解决。

目前，基于内模原理[11]的重复控制理论研究已比较成熟，研制的控制器也被广泛用于电网谐波治理领域。文献 [12] 采用 PI+ 电网电压前馈控制的复合控制策略，一定程度上抑制了并网电流谐波，但系统动态性能有待提升。文献 [13] 结合 PI 控制方法提出组合谐波抑制方法，能有效抑制并网电流的低次谐波，减小稳态误差，但算法过程比较复杂。文献 [14] 中，将 PI+ 重复控制的复合策略用于同步坐标系统，以简化坐标变换和解耦过程，有效抑制了网络的电流谐波，但还需要提高并网电流谐波抑制能力。文献 [15] 采用有限脉冲响应数字滤波器代替传统的组合补偿器作为重复控制器，结合传统的 PI 控制技术，有效抑制了电流谐波，但在高频处会出现失真现象。文献 [16] 中，采用了 PI 和其它控制方法结合的重复控制策略方案来提高重复控制的动态响应速度，使系统具有良好的动态响应与稳态特性，但该策略比较复杂，系统稳定性较差。文献 [17] 利用加权思想实现了增强控制环节的预期控制效果，为系统带来了更好的切换动态性能，但补偿器设计较复杂。

本研究对 LCL 型并网光伏逆变器进行了数学建模，通过波特图分析了外界干扰条件下高次系数对系统稳定性的影响，同时针对传统单一控制策略不能确保系统稳定性良好并影响并网电流质量的问题，提出一种基于两相静止坐标系下 PI+ 重复控制的优化策略，通过 PI 与重复控制器的优化设计，参数的优化设计，应用仿真对比不同坐标下重复控制策略，以及 PI+ 重复控制的优化策略，证明了所提优化方案不仅可简化坐标变换以及解耦工作，且在一定程度上降低了并网电流 THD，提高了并网电流质量。

2 LCL 型光伏逆变器

2.1 拓扑结构

三相 LCL 型光伏逆变器的拓扑结构如图 1 所示。其中，U_{dc} 为直流母线电压，C_{dc} 为直流侧电容，i_{dc} 为直流侧电流，R 为直流母线上的限流电阻，T1~T6 为 IGBT，L_{1k}、L_{2k} 分别为逆变器侧电感和电网侧电感，R_{1k}、R_{2k} 分别为逆变器侧寄生电阻和电网侧寄生电阻，i_{1k}、i_{2k} 分别为电感 L_{1k}、L_{2k} 上的电流，i_{C_k}、U_{C_k} 分别为电容 C_k 端的电流和电压，u_{gk} 为电网各相电压，其中 k=a、b、c。

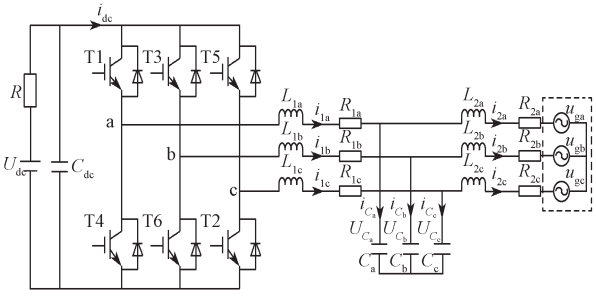


图 1 三相 LCL 光伏并网逆变器的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of three-phase LCL grid-connected inverter

2.2 数学模型

由图 1 可知，在三相平衡时，由基尔霍夫电压电流定律可得：

$$\begin{cases} U_k(t)=U_{C_k}(t)+L_{1k}\dfrac{\mathrm{d}i_{1k}(t)}{\mathrm{d}t}+R_{1k}i_{1k}(t), \\ i_{1k}(t)=C_k\dfrac{\mathrm{d}U_{C_k}(t)}{\mathrm{d}t}+i_{2k}(t), \\ U_{C_k}(t)=L_{2k}\dfrac{\mathrm{d}i_{2k}(t)}{\mathrm{d}t}+U_{2k}(t)+R_{2k}i_{2k}(t)。 \end{cases} \quad (1)$$

对式（1）进行拉氏变换和 Clark 变换，可得静止坐标下状态逆变器模型为

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}i_{2r}(t)}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{L_{2k}}U_{C_r}(t)-\dfrac{1}{L_{2k}}U_{2r}(t)+\dfrac{1}{L_{2k}}R_{2k}i_{2r}(t),\\ \dfrac{\mathrm{d}i_{1r}(t)}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{L_{1k}}U_{r}(t)-\dfrac{1}{L_{1k}}U_{C_r}(t)+\dfrac{1}{L_{1k}}R_{1k}i_{1r}(t),\\ \dfrac{\mathrm{d}U_{C_r}(t)}{\mathrm{d}t}=\dfrac{1}{C_k}i_{1r}(t)-\dfrac{1}{C_k}i_{2r}(t)。\end{cases}\quad(2)$$

式中 r=α、β。

此时，$\alpha\beta$ 坐标系下 LCL 滤波器模型框图如图 2 所示。

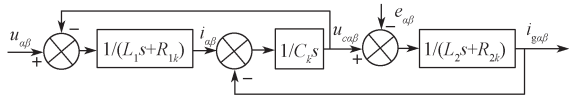


图 2　$\alpha\beta$ 坐标系下 LCL 滤波器模型框图

Fig. 2　Block diagram of LCL filter model in $\alpha\beta$ coordinate system

单独取 a 相分析，$e_{\alpha\beta}$ 为输入干扰量，则可获得 LCL 滤波器输入电流 $i_{g\alpha\beta}$ 与桥臂之间的输出电压 $u_{\alpha\beta}$ 之间的开环传递函数为

$$P(s)=\frac{1}{As^3+Bs^2+Cs+D},\quad(3)$$

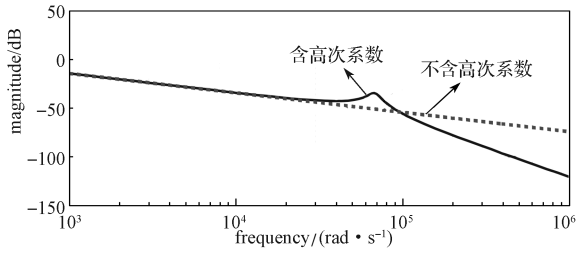
式中：$A=L_{1a}L_{2a}C_a$；

$B=(L_{1a}R_{2a}+L_{2a}R_{1a}+L_{1a}+L_{2a})C_a$；

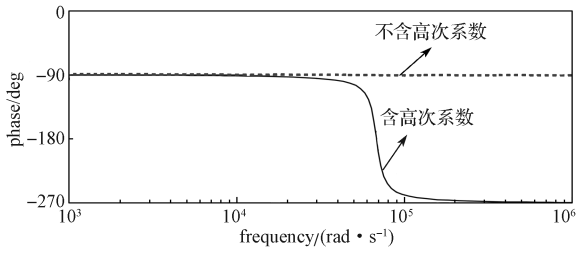
$C=L_{1a}+L_{2a}+R_{1a}R_{2a}C_a$；

$D=R_{2a}+R_{1a}$。

开环传递函数波特图如图 3 所示。



a）幅值图



b）相位图

图 3　开环传递函数波特图

Fig. 3　Bode diagram of the open-loop transfer function

对比图 3 中的逆变系统含高次系数与不含高次系数的波特图可知，高阶系数对低频信号影响不大，其相应系数可忽略不计，此时的开环传递函数可简化为

$$P(s)=\frac{1}{(L_{1a}+L_{2a}+R_{1a}R_{2a}C_a)s+R_{2a}+R_{1a}}\approx\frac{1}{6\times10^{-3}s+0.04}。\quad(4)$$

3　复合控制策略的优化设计

3.1　PI+ 重复控制优化方案

为了使并网逆变器能取得良好的动态和静态性能，其电流环采用 PI+ 重复控制策略，其控制优化方案如图 4 所示。

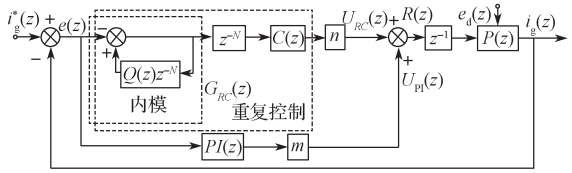


图 4　两相静止坐标下 PI+ 重复控制优化系统

Fig. 4　PI and repetitive control optimization system in two-phase stationary coordinates

图 4 中：N 是采样频率与基频的比值，即一个基波周期的采样点数；补偿器 $C(z)$=$k_rz^kS(z)$，其中 k_r 是重复控制增益，它保证了系统在中频段和高频段的稳定性，$S(z)$ 对高频衰减、中低频增益校正和共振峰的消除有很好的效果；z^{-N} 是延迟链路，目的是使 $C(z)$ 中的超前环节链路 z^k 能够实现；$Q(z)$ 为重复控制器内模函数；$e_d(z)$ 为作用在被控对象上的周期扰动；$P(z)$ 为被控对象；其中 z^{-1} 为采样和脉宽调制更新延迟环节，可通过可变采样周期对信号延迟并输出，m、n 为引入的加权系数，其中 m+n=1。

通过 Clark 变换三相电网的电压和电流，以获得静止坐标中的电压 $u_{\alpha\beta}$ 和电流 $i_{g\alpha\beta}$。可由瞬时功率原理得出电流内环的电流参考值 $i_{\alpha\beta\text{-ref}}$，并与电网反馈电流 $i_{g\alpha\beta}$ 比较，在改进的 PI 控制器执行“粗调”操作之后，由重复控制器执行“微调”操作，并且将电网电压 $u_{\alpha\beta}$ 作为反馈干扰补偿项，以减少系统控制器引起的误差。最后，将反 Clark 变换后的控制量通过更新延迟环节 z^{-1} 对信号进行延迟输出以进行采样和脉宽调制，并对并网逆变器进行稳定控制。PI+ 重复控制策略的框图如图 5 所示。

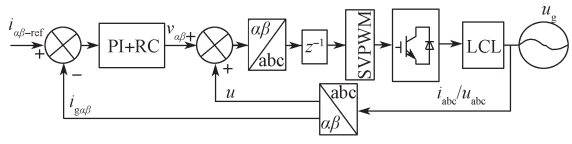


图 5　两相静止坐标系下复合控制框图

Fig. 5　Compound control block diagram in two-phase stationary coordinate system

复合控制系统使用重复控制在逐个周期的基础上叠加周期性误差信号，实现获得近乎无差的跟踪能力。复合控制利用 PI 控制器良好的动态调节性能，

结合重复控制自身良好的稳态控制性能，有效提高了并网逆变器电流的动态性以及降低了电流 THD。重复控制器仅校正 PI 控制结果，系统动态响应速度仍然由 PI 控制器确定，这种并行模式可以轻松切断重复控制器。本研究将 PI 控制支路与重复控制支路进行并联连接，构成“PI+ 重复控制”的复合控制策略并引入加权系数，在 PI 支路上引入加权系数 m 对系统进行“粗调”[18]，在满足系统快速性要求的同时，还可以使系统获得较好的动态性能；在重复控制支路上引入加权系数 n 对系统进行“细调”，可加强对系统稳态误差的不断修正并消除稳态误差以满足系统的稳态性要求。最后，通过调整加权系数 m 与 n 比例，以此达到系统总体设计要求。

3.2 重复控制器设计

本研究所提出的控制策略中，其指令信号的相位以及频率由锁相环提供。重复控制器从内模函数 $Q(z)$、补偿器 $C(z)$ 和延迟环节 z^{-N} 的几个重要离散函数进行优化。

3.2.1 内模函数 $Q(z)$ 设计

由图 4 可得到离散域下内模函数为

$$G_{\text{in}}(z)=1/(1-Q(z)z^{-N})\ 。\tag{5}$$

由于内部模型函数 $Q(z)$ 越大，控制增益越大，稳态精度越高，但稳定性越差。相反，控制增益越小，控制精度越差，稳定性越强。为了使内模稳定，获得较好的控制增益与控制精度，通常取内模函数的经验值，即取 0.95 则可获得较高的系统稳定性。

3.2.2 补偿器 $C(z)$ 设计

当指令信号 $i_{\text{g}}^{*}(z)$ 和扰动信号 $e_{\text{d}}(z)$ 在重复控制器内模中混合时，根据受控对象 $P(z)$ 输出的指令信号特性，补偿器 $C(z)$ 的设计需合理优化。理想情况下，$C(z)=P(z)^{-1}$，根据重复控制原理，当 $C(z)P(z)=1$ 时，它是最理想的补偿器。由于此时 $C(s)$ 包含导数项，因此不容易数字实现，故添加一个高频点给 $C(s)$，由式（4）可得补偿器为

$$C(s)=\frac{10\ 000}{s+10\ 000}P(s)^{-1}=\frac{60s+400}{s+10\ 000},\tag{6}$$

对 $C(s)$ 进行双线性离散化，其中采样周期为 1×10^{-4} s，可得离散化的补偿器 $C(z)$ 为

$$C(z)=\frac{40.01z-39.99}{z-0.333}。\tag{7}$$

由于已确定并网逆变器系统的硬件参数，因此，重复控制器的参数设置是固定的，无需在复杂的调试过程中修改参数，这在一定程度上有效提高了调试工作的效率。

3.2.3 补偿器 z^{-N} 设计

本研究中延迟环节 z^{-N} 将信号延迟 N 个采样周期。当 $N<f_{\text{s}}/f_0$ 时，控制信号会出现一定的超前现象，为弥补滞后环节与惯性环节对控制对象造成的滞后。本次实验中 f_{s}=10 kHz，故 N=200。考虑逆变器自身采样和计算延迟的总时间约为 2 个周期，故文中延迟环节设计为 z^{-198}，可实现 2 个周期的超前控制。

3.3 $Q=m/n$ 设计

文中 Q 为加权系数 m 与 n 的比值即加权值，根据 m 和 n 的确定原则，可以通过图 4 中的两相静止坐标下 PI+ 重复控制优化系统所得的传递函数 $G(z)$ 获取。从图 4 可以看出，系统的带宽是随着 Q 值即加权系数 m 和 n 变化而变化的。所以，可以直接通过传递函数 $G(z)$ 而间接获得合适的加权系数 m 和 n，其中 $m+n$=1。因此，在不考虑干扰的情况下，$e(z)$ 和误差参考电流 $i_{\text{g}}^{*}(z)$ 间的传递函数 $G(z)$ 可以从图 4 得到（无内膜）：

$$G(z)=\frac{i_{\text{g}}^{*}(z)}{e(z)}=$$

$$nPI(z)P(z)+mC(z)P(z)z^{-N}\ 。\tag{8}$$

由式（8）可得不同加权值时开环传递函数 $G(z)$ 的波特图，如图 6 所示。

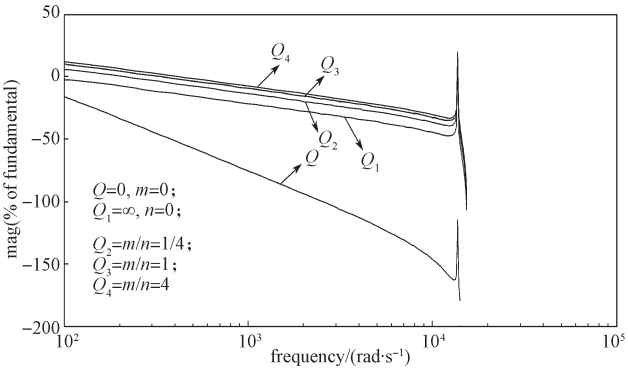


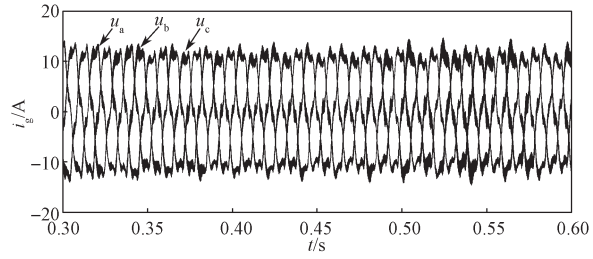
图 6 不同 Q 时系统波特图

Fig. 6 Bode diagram of systems with different Q values

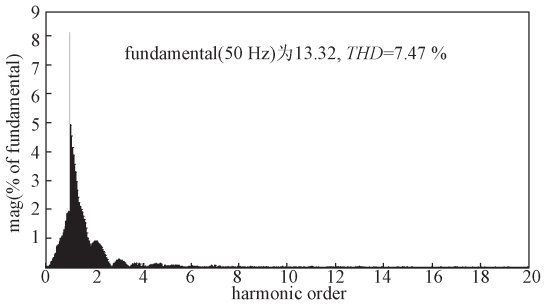
由图 6 可以看出，系统的带宽是随着 Q 值变化而变化的，Q 值越大，带宽越宽，系统的动态性能越好。为了能获得较好的带宽和动态性能，同时考虑到系统 THD 和动态性能的要求，故本文折中选择 $Q=m/n=4$，即 m=0.8、n=0.2，此时的 Q 值较理想，带宽比较宽，系统的动态性能较好，在一定程度上可以加强并联 PI 环节的调节作用。这样既可以达到对系统进行“粗调”以满足系统的动态性能，又可以对系统进行“细调”以满足系统的稳态性要求。

4　仿真结果与分析

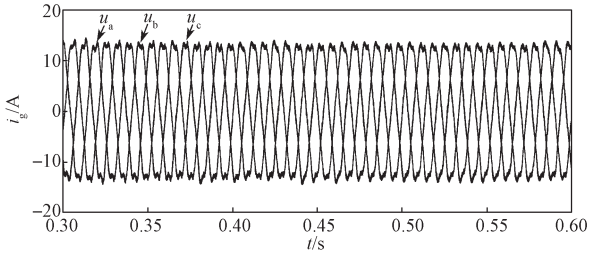
在 Matlab/Simulink 仿真软件上对复合控制搭建仿真模型，并设定直流母线电压为 520 V，电网额定相电压为 220 V，额定频率为 50 Hz，开关频率与采样频率均为 10 kHz，仿真时长为 0.6 s，L_{1k}=5 mH、L_{2k}=1 mH、C_k=2.2 F、R_{1k}=R_{2k}=0.02 Ω，得到不同坐标系下重复控制的并网电流波形以及谐波含量如图 7 所示。



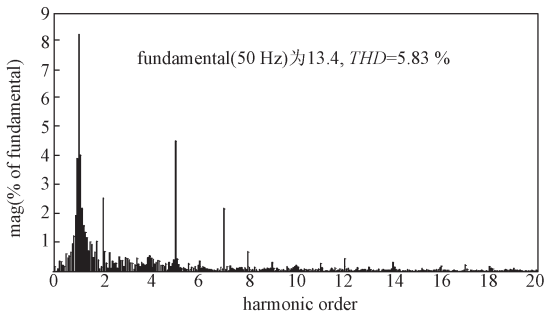
a）*dq* 坐标系下重复控制的并网电流波形



b）*dq* 坐标系下重复控制的谐波含量



c）*αβ* 坐标系下重复控制的并网电流波形

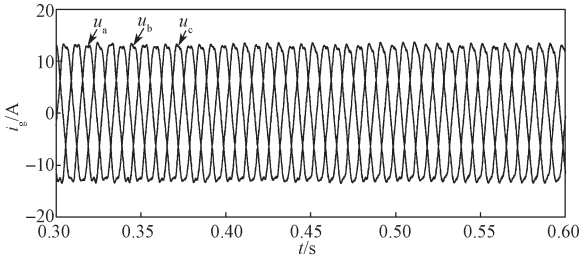


d）*αβ* 坐标系下重复控制的谐波含量

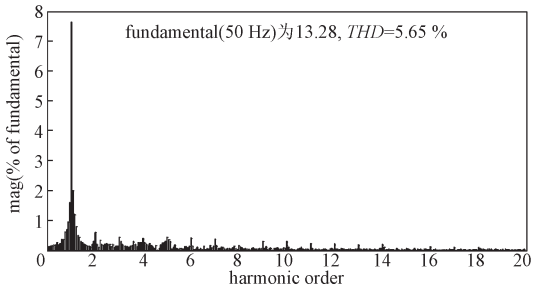
图 7　重复控制的并网电流波形及谐波含量

Fig. 7　Harmonic content of repetitive control in *αβ* coordinate system

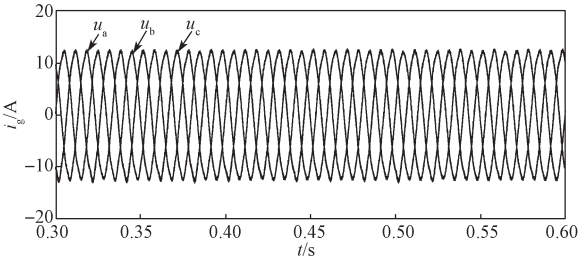
对比图 7 中两种不同坐标系下采用重复控制的并网电流波形及谐波含量的仿真图可知，*dq* 坐标系下并网电流的 THD 高达 7.47%，而在 *αβ* 坐标系下并网电流的 THD 只有 5.83%。因此，可看出后者并网电流总谐波畸变率较小，控制效果比前者好，但均高于并网电流 THD 5% 的标准。为进一步抑制电网谐波，降低并网电流畸变率，对逆变器控制策略进一步优化设计，可再次得到不同坐标系下 PI+ 重复控制策略的并网电流波形及谐波含量，如图 8 所示。



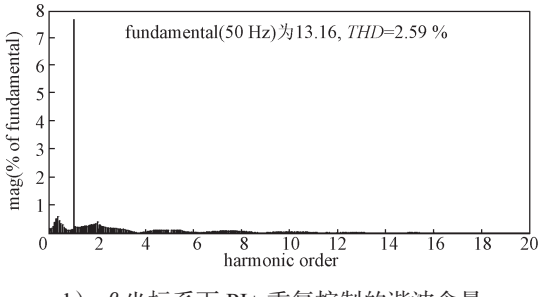
a）旋转坐标系下 PI+ 重复控制的并网电流波形



b）旋转坐标系下 PI+ 重复控制的谐波含量



c）*αβ* 坐标系下 PI+ 重复控制的并网电流波形



d）*αβ* 坐标系下 PI+ 重复控制的谐波含量

图 8　复合控制的并网电流波形及谐波含量

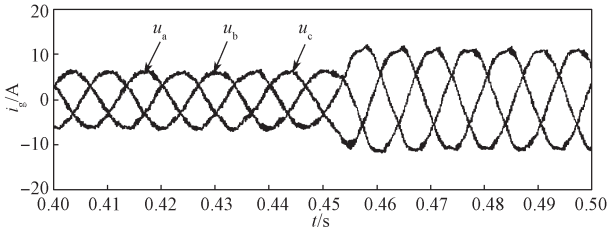
Fig. 8　Harmonic content of PI+ repetitive control in *αβ* coordinate system

对比图 8 所示旋转坐标系和 *αβ* 坐标系下采用 PI+ 重复控制复合策略时的并网电流波形及谐波含量的仿真结果图可知：在旋转坐标系下采用 PI+ 重复控

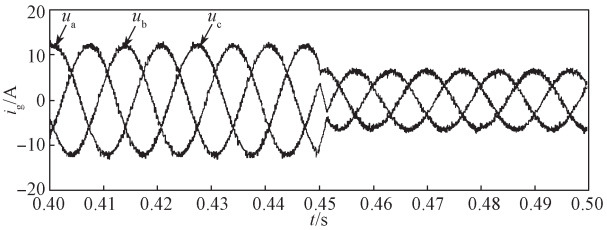
制的复合策略时，并网电流的 THD 为 5.65%，此时不满足并网要求，如图 8a、b 所示；在静止坐标系下采用 PI+ 重复控制的复合策略时，并网电流的 THD 仅为 2.59%，此时满足并网要求，如图 8c、d 所示。

比较图 7、图 8 的仿真结果可得，在静止坐标系下采用 PI+ 重复的复合控制策略时，总谐波失真率较小，具有更好的控制效果。

此外，当电网的负载大小发生变化时，可得到相应的并网电流波形如图 9 所示。



a）半载突变为满载



b）满载突变为半载

图 9 负载变化时的并网电流波形

Fig. 9 Grid-connected current wave-forms with load changes

由图 9 可知，在时间点 t=0.45 s 时负载变化。当负载突然由半载变为满载时，得到的并网电流波形如图 9a 所示，并网电流可在一个周期内恢复到稳定状态；当负载突然由满载变为半载时，可得到相应的并网电流波形如图 9b 所示，此时并网电流在一个周期内依然可以迅速恢复并达到稳定状态。这表明该系统具有较快的动态响应能力，故稳态所提出的策略能够满足系统动态响应能力的需求。

5 结语

对 LCL 型三相光伏并网逆变器的电流控制方案进行了分析。针对同步旋转坐标系下传统的 PI 控制方案和复杂的坐标变换与解耦计算问题，以及对入网电流控制能力上的不足等问题，提出在 PI 控制方案基础上引入重复控制方案，并将两种方案有机结合，提出静止坐标系下采用 PI+ 重复控制策略的优化控制策略，它不仅简化了坐标变换和解耦计算过程，而且直接控制并网电流，从而更好地抑制了谐波对并网电流质量的影响，改善了并网电流质量。同时在 PI 控制支路和重复控制支路分别加入加权系数 m 和 n，在一定程度上降低了并网电流的 THD，提高了系统的动态性能和稳定性能。在 Matlab/Simulink 平台上进行仿真，验证了该优化控制策略的可行性。

参考文献：

[1] KILLINGER S，GUTHKE P，SEMMIG A，et al. Upscaling PV Power Considering Module Orientations[J]. IEEE Journal of Photovoltaics，2017，7(3)：941−944.

[2] VALENCIA F，PALMA-BEHNKE R，ORTIZ-VILLALBA D，et al. Special Protection Systems：Challenges in the Chilean Market in the Face of the Massive Integration of Solar Energy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2017，32(1)：575−584.

[3] 谢 震，汪 兴，张 兴，等 . 基于谐振阻尼的三相 LCL 型并网逆变器谐波抑制优化策略 [J]. 电力系统自动化，2015，39(24)：96−103.
XIE Zhen，WANG Xing，ZHANG Xing，et al. Optimized Harmonic Suppression Strategy of Grid-Connected Inverter with an LCL-Type Filter Based on Resonance Damping[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(24)：96−103.

[4] 林海雪 . 电能质量指标的完善化及其展望 [J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5073−5079.
LIN Haixue. Perfecting Power Quality Indices and Prospect[J]. Power System Technology，2014，34(29)：5073−5079.

[5] 李圣清，张威威 . 电容电流反馈的 LCL 滤波器网压前馈控制研究 [J]. 电力电子技术，2019，53(2)：51−53，69.
LI Shengqing，ZHANG Weiwei. Research on Grid Voltage Feedforward Control of LCL Filter with Capacitor Current Feedback[J]. Power Electronics，2019，53(2)：51−53，69.

[6] 李建林，袁晓冬，郁正纲，等 . 利用储能系统提升电网电能质量研究综述 [J]. 电力系统自动化，2019，43(8)：15−25.
LI Jianlin，YUAN Xiaodong，YU Zhenggang，et al. Comments on Power Quality Enhancement Research for Power Grid by Energy Storage System[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(8)：15−25.

[7] 郭 放，李大中 . 光伏并网逆变器性能检测技术及智能检测平台系统研究 [J]. 电力学报，2012，27(5)：498−501，524.
GUO Fang，LI Dazhong. Photovoltaic Grid-Connected Inverter Performance Testing Technology and Smart Detection System Research[J]. Journal of Electric

Power，2012，27(5)：498−501，524.

[8] 周京华，祝天岳，李　津，等 . 大功率光伏逆变器的关键技术研究与实现 [J]. 电力电子技术，2015，49(8)：37−40.
ZHOU Jinghua，ZHU Tianyue，LI Jin，et al. High Power PV Inverter Key Technology Research and Implementation[J]. Power Electronics，2015，49(8)：37−40.

[9] 廖志鹏，刘志宇，郗瑞霞 . 光伏逆变器并网电流谐波抑制方法 [J]. 电气传动，2018，48(9)：28−33.
LIAO Zhipeng，LIU Zhiyu，XI Ruixia. Harmonic Suppression Method for Grid Connected Photovoltaic Inverter[J]. Electric Drive，2018，48(9)：28−33.

[10] 刘　波，杨　旭，孔繁麟，等 . 三相光伏并网逆变器控制策略 [J]. 电工技术学报，2012，27(8)：64−70.
LIU Bo，YANG Xu，KONG Fanlin，et al. Control Strategy Study for Three Phase Photovoltaic Grid-Connected Inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2012，27(8)：64−70.

[11] 刘鸿鹏，朱　航，吴　辉，等 . 新型光伏并网逆变器电压型控制方法 [J]. 中国电机工程学报，2015，35(21)：5560−5568.
LIU Hongpeng，ZHU Hang，WU Hui，et al. A Novel Voltage-Controlled Method for the Grid-Connected Photovoltaic Inverter[J]. Proceedings of the CSEE，2015，35(21)：5560−5568.

[12] 金立军，侯　珂，程逸帆 . 基于 Pareto 支配法的微电网多目标能量优化短时调度策略研究 [J]. 电工技术学报，2016，31(增刊 2)：167−175.
JIN Lijun，HOU Ke，CHENG Yifan. Study on Short-Term Scheduling Strategy for Multi-Objective Energy Optimization of Microgrid Based on Pareto Domination[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(S2)：167−175.

[13] 陈　东，张军明，钱照明 . 一种具有频率变化适应性的并网逆变器改进型重复控制方法 [J]. 电工技术学报，2014，29(6)：64−70.
CHEN Dong，ZHANG Junming，QIAN Zhaoming. An Improved Repetitive Control Scheme for Grid-Connected Inverter with Frequency-Varying Adaptability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2014，29(6)：64−70.

[14] 王立建，王明渝，高文祥，等 . 复合控制技术在独立光伏并联发电系统中的应用研究 [J]. 电力系统保护与控制，2012，40(7)：88−93.
WANG Lijian，WANG Mingyu，GAO Wenxiang，et al. Research of Multiple Control Technology for Stand-Alone Photovoltaic Parallel System[J]. Power System Protection and Control，2012，40(7)：88−93.

[15] 张学广，马　彦，李　瑞，等 . 两相静止坐标系下并网逆变器的重复控制策略 [J]. 电工技术学报，2016，31(9)：85−91.
ZHANG Xueguang，MA Yan，LI Rui，et al. Repetitive Control Strategy for Grid-Connected Converters in Stationary Frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(9)：85−91.

[16] ZHANG J，CHENG Y H，YIN C，et al. Grid-Connected Photovoltaic System Using Compound Current Control of the Novel Repetitive and PI[C]// International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. Shanghai：IEEE，2015：563−564.

[17] LU W Z，ZHOU K L，WANG D W，et al. A General Parallel Structure Repetitive Control Scheme for Multiphase DC−AC PWM Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2013，28(8)：3980−3987.

[18] 王禹玺，刘秦维，刘　伟，等 . 一种加权式并联型重复控制的研究 [J]. 电工技术学报，2015，30(8)：127−134.
WANG Yuxi，LIU Qinwei，LIU Wei，et al. Study of Weighted Parallel-Type Repetitive Control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2015，30(8)：127−34.

(责任编辑：姜利民)