

DOI: 10.7667/PSPC151493

# PDFI 控制下单相光伏并网逆变器的混合阻尼控制策略

杨秋霞, 李坤, 王虎, 赵翠妹

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 传统的比例积分(PI)控制由于具有一定的稳态误差, 无法实现对并网电流快速精确的控制, 光伏系统并网以后所引入的电网电感对 LCL 滤波器的阻尼策略也有着不可忽略的影响。为了解决上述问题, 提出了一种 PDFI 控制下单相光伏并网逆变器的混合阻尼控制策略。该策略介绍了比例延时反馈积分(PDFI)控制, 在原有的 PI 控制上加上简单反馈电路, 实现了并网电流的无稳态误差控制。同时分析了以阻尼系数为研究对象的混合阻尼控制, 改善了电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响。理论分析、实例仿真的结果表明, 该控制策略下, 系统能够稳定运行, 并网电流实现了精确控制, 并且对电网电感具有良好的适应性。

**关键词:** 光伏并网逆变器; 比例延时反馈积分; 稳态误差; LCL 滤波器; 混合阻尼策略

## Hybrid damping strategy for single-phase grid-connected PV inverter under the control of PDFI

YANG Qiuxia, LI Kun, WANG Hu, ZHAO Cuimei

(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The conventional proportional-integral (PI) control can not achieve the rapid and precise control of the grid-connected current because of its steady-state error. The introduction of grid inductor also has a non-negligible impact to damping strategy of the LCL filter when the PV system connects into the grid. To overcome the problems mentioned above, this paper presents a hybrid damping control strategy for single-phase grid-connected PV inverter with the control of PDFI. This strategy introduces proportional delay feedback integral (PDFI) control which adds a simple feedback circuit to the original PI control and can achieve the control of the grid current without steady-state error. The hybrid damping control is also analyzed which takes damping coefficient as the research object, and the impact of the grid inductor to damping strategy of the LCL filter is improved with addition of the hybrid damping control. The results of the theoretical analysis and the simulation both show that the proposed strategy has a great contribution to the control of the grid current and the steady operation of the system, and also has a good adaptability to the grid inductor.

This work is National Natural Science Foundation of China (No. 61573303) and Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2016203092).

**Key words:** PV grid-connected inverter; PDFI; steady-state error; LCL filter; hybrid damping strategy

## 0 引言

随着化石燃料的日益紧缺, 新能源发展形势愈发开阔。其中, 太阳能作为重要的可再生能源, 应用也愈加广泛, 以此为基础的光伏发电发展尤为蓬勃<sup>[1]</sup>。光伏并网系统的核心即是逆变器, 并网逆变器通过控制并网电流来达到向电网传输功率的目的<sup>[2-3]</sup>。传统的并网电流控制都采用成熟的 PI 控制, 但因为 PI 控制具有一定的稳定误差, 无法实现对并网电流精确快速的控制, 而这恰恰是光伏系统并

网运行的关键之一<sup>[4]</sup>。采用同步旋转坐标系 PI 控制可以很好地解决稳态误差这一问题<sup>[5]</sup>, 但其无法直接应用到单相光伏并网逆变器中。当然, 将单相系统通过信号重构的方法构造成三相系统可以应用同步旋转坐标系, 但是方式过于复杂, 同时计算量也很大。为解决这一问题, 本文引入了比例延时反馈积分控制, 即 PDFI 控制。它无需过于繁杂的方式, 只需在 PI 控制的基础上加上一个简单的延迟反馈环节, 即可实现对并网电流的零稳态误差控制<sup>[6]</sup>。

另一方面, 为了解决 LCL 滤波器的谐振问题, 有源阻尼<sup>[7-8]</sup>与无源阻尼<sup>[9]</sup>被先后引入到光伏逆变系统的控制中, 两者通过不同的方式, 均可以很好地改善 LCL 滤波器的谐振情况。但是, 光伏逆变系

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573303); 河北省自然科学基金资助项目(E2016203092)

统并入电网以后, 不管形式怎样, 都会不可避免地引入电网电感, 电网电感对 LCL 滤波器的阻尼策略有着不可忽略的影响<sup>[10]</sup>。针对于形式为电容电流反馈的有源阻尼, 电网电感对其具有增强作用, 针对于形式为在滤波电容旁串联阻尼电阻的无源阻尼, 电网电感对其具有削弱作用<sup>[11]</sup>。

本文在引入 PDFI 控制的基础上, 针对于电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响, 引入了混合阻尼这一控制策略。混合阻尼控制结合 PDFI 控制, 可实现系统的稳定运行、并网电流的零稳态误差控制等目标。

## 1 PDFI 控制策略的引入

图 1 是一个典型的含有扰动量的控制系统框图, 其中:  $R(s)$  是输入量;  $C(s)$  是输出量;  $D(s)$  是扰动量;  $G(s)$  为控制器;  $P(s)$  为被控对象。

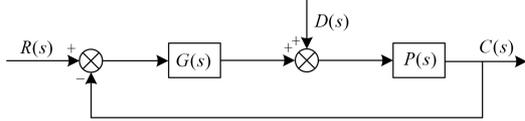


图 1 含有扰动量的典型控制系统框图

Fig. 1 A typical block diagram of the control system containing an amount of disturbance

根据经典控制理论可知, 若要实现对输出量  $C(s)$  的精确控制, 需要使输出量  $C(s)$  紧紧跟着输入量  $R(s)$ , 并且不受扰动量  $D(s)$  的影响, 最终要达到的目的是  $C(s) = R(s)$ 。

根据图 1, 可推导出输出量的表达式为

$$C(s) = \frac{G(s)P(s)}{1 + G(s)P(s)} R(s) + \frac{P(s)}{1 + G(s)P(s)} D(s) \quad (1)$$

PDFI 控制是控制器  $G(s)$  在 PI 控制的基础上增加了一个延迟反馈环节, 图 2 为 PDFI 控制的结构框图。

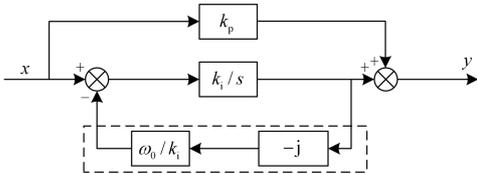


图 2 PDFI 控制的结构框图

Fig. 2 Structure diagram of the PDFI control

图 2 中, “-j” 表示将工频正弦信号滞后  $90^\circ$ , 即将反馈量传递延迟  $5 \text{ ms}$ 。根据图 2, 可以计算出 PDFI 控制器的传递函数为

$$G(s) = \frac{y}{x} = \frac{k_p s + k_i - j k_p \omega_0}{s - j \omega_0} = \frac{N(s)}{s - j \omega_0} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可以得到:

$$C(s) = \frac{N(s)P(s)}{(s - j\omega_0) + N(s)P(s)} R(s) + \frac{(s - j\omega_0)P(s)}{(s - j\omega_0) + N(s)P(s)} D(s) \quad (3)$$

当系统的输入量  $R(s)$  与扰动量  $D(s)$  的频率与式(2)中给定的频率  $\omega_0$  保持一致的时候, 式(3)可变换为

$$C(j\omega_0) = \frac{N(j\omega_0)P(j\omega_0)}{(j\omega_0 - j\omega_0) + N(j\omega_0)P(j\omega_0)} R(j\omega_0) + \frac{(j\omega_0 - j\omega_0)P(j\omega_0)}{(j\omega_0 - j\omega_0) + N(j\omega_0)P(j\omega_0)} D(j\omega_0) \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 输入量  $R(s)$  的系数变为 1, 而扰动量  $D(s)$  的系数则变为 0。这表明, 输出量  $C(s)$  紧紧地跟着输入量  $R(s)$  而完全不受扰动量  $D(s)$  的影响, 即实现了  $C(s) = R(s)$ , 也即实现了对被控量无稳态误差的控制。

## 2 混合阻尼控制策略的引入

### 2.1 LCL 滤波器的数学模型

图 3 为含有 LCL 滤波器的单相光伏并网逆变器的拓扑结构。其中,  $U_{dc}$  与  $i_{dc}$  为光伏电池所产生的直流电压和电流,  $U_g$  为电网电压。忽略掉数值微小的电感电容寄生电阻以后, LCL 滤波器则由逆变器侧电感  $L_1$ , 滤波电容  $C_f$  以及网侧电感  $L_2$  构成。

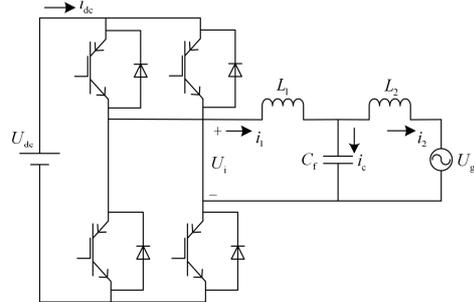


图 3 含有 LCL 滤波器的单相光伏并网逆变器的拓扑结构

Fig. 3 Topological structure of single-phase photovoltaic grid-connected inverter containing LCL filter

按照图 3 所示的光伏逆变器的拓扑结构并结合相关的电路知识, 可以得到含有 LCL 滤波器的逆变系统的电路方程组:

$$\begin{cases} U_i - U_c = L_1 \frac{di_1}{dt} \\ i_c = C_f \frac{dU_c}{dt} = i_1 - i_2 \\ U_c - U_g = L_2 \frac{di_2}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

方程组(5)中,  $U_i$  为逆变器将直流电压逆变后的交流电压,  $U_c$  为滤波电容的电压,  $i_1$  为逆变器侧电流,  $i_c$  为滤波电容的电容电流,  $i_2$  为网侧电流, 即并网电流。将方程组(5)转换为复频域下的表达式, 即可建立起 LCL 滤波器的数学模型, 其形式为

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{C_f L_1 L_2 s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (6)$$

从式(6)LCL 滤波器的传递函数来看, 分母项中缺少  $s^2$  的系数, 根据控制理论中的劳斯-赫尔维茨稳定判据可知, 系统肯定是处于不稳定的状态中。

## 2.2 电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响

光伏并网逆变系统并入电网的形式多种多样, 但不论哪种形式, 都会因为并网时线缆、负载以及变压器等电力设备所具有的阻抗而引入电网电感, 在弱电网及多个光伏并网逆变系统并联入网时, 这种情况更为普遍<sup>[10]</sup>。

在本文中, 将电网电感定义为  $L_g$ , 并将其置于网侧电感  $L_2$  的一端。根据式(6), 加入电网电感以后, LCL 滤波器的数学模型变换为

$$G(s) = \frac{i_2(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{C_f L_1 (L_2 + L_g) s^3 + (L_1 + L_2 + L_g)s} \quad (7)$$

为了直观地看到电网电感的加入对 LCL 滤波器的影响, 根据式(7), 绘制出 LCL 滤波器传递函数的伯德图如图 4 所示。其中, 曲线 1 为不考虑电网电感的 LCL 滤波器, 曲线 2 为考虑电网电感的

LCL 滤波器。

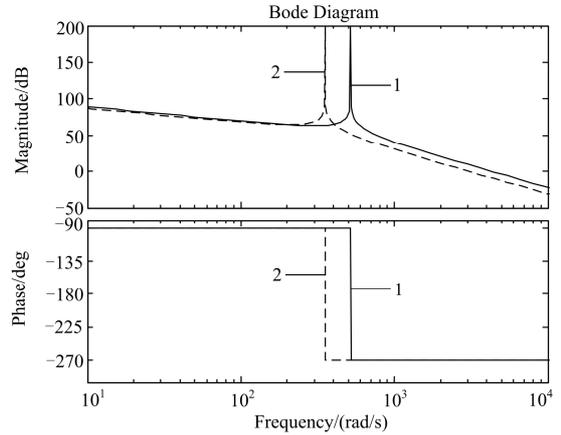


图 4 LCL 滤波器的伯德图

Fig. 4 Bode plot of the LCL filter

从图 4 中可清晰地观察到, 考虑了电网电感以后, LCL 滤波器的谐振频率明显降低了。所以 LCL 滤波器的阻尼策略必须考虑到电网电感的影响。

## 2.3 混合阻尼控制策略

基于文献[10-11]的研究, 电网电感的加入对有源阻尼有增强作用, 对无源阻尼有削弱作用。为了抑制电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响, 本文引入了有源阻尼和无源阻尼相互作用的混合阻尼控制策略, 以充分利用两者互补的优势, 其控制原理框图如图 5 所示。

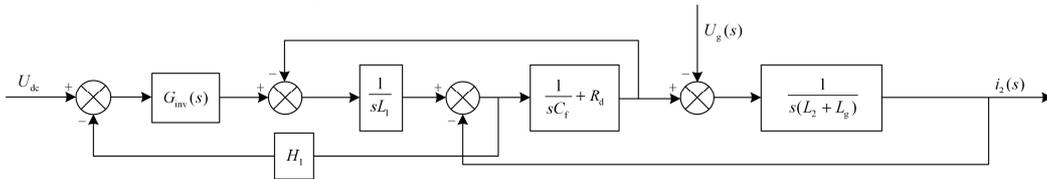


图 5 LCL 滤波器的混合阻尼控制框图

Fig. 5 Hybrid damping control block diagram of the LCL filter

图中,  $R_d$  为无源阻尼控制策略中的阻尼电阻,  $H_1$  为有源阻尼控制策略中电容电流的反馈系数,  $U_{dc}$  为直流母线电压,  $G_{inv}(s)$  为逆变器的数学模型。由于 SPWM 调制方式载波频率远远高于逆变器输出电流基波频率(50 Hz), 不考虑死区等非线性因素可将逆变器数学模型简化为比例放大环节, 即

$$G_{inv}(s) = K_{pwm} \quad (8)$$

图 5 控制框图的传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{\omega_{LC}^2 + \frac{R_d}{L_2 + L_g} s}{L_1 s [s^2 + (\frac{k}{L_1 \omega_{res}^2} + R_d C_f) \omega_{res}^2 + \omega_{res}^2]} \quad (9)$$

$$\text{其中, } \omega_{LC} = \sqrt{\frac{1}{(L_2 + L_g)C_f}}, \quad \omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_g}{(L_2 + L_g)C_f}}.$$

在本文中, 将有源阻尼系数定义为  $\xi_{AD}$ , 其表达式为

$$\xi_{AD} = \frac{H_1}{2L_1 \omega_{res}} = \frac{H_1}{2L_1} \sqrt{\frac{L_1 (L_2 + L_g) C_f}{L_1 + L_2 + L_g}} \quad (10)$$

无源阻尼系数定义为  $\xi_{PD}$ , 其表达式为

$$\xi_{PD} = \frac{R_d C_f \omega_{res}}{2} = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{(L_1 + L_2 + L_g) C_f}{L_1 (L_2 + L_g)}} \quad (11)$$

将混合阻尼控制的总的阻尼系数定义为  $\xi$ , 其表达式为

$$\xi = \xi_{PD} + \xi_{AD} = \frac{R_d C_f \omega_{res}}{2} + \frac{H_1}{2L_1 \omega_{res}} \quad (12)$$

式(12)中, 等式右侧第一项表示无源阻尼的阻尼系数, 第二项表示有源阻尼的阻尼系数。当电网电感增大时, LCL 滤波器的谐振频率会因其增大而降低, 虽然无源阻尼的作用减小, 但是有源阻尼的作用得到了增强。所以, 通过合理的设计, 可以保证随着电网电感的加入, 系统的总混合阻尼系数维持不变, 也即是说, 可以在一定程度上抑制电网电感的加入对 LCL 滤波器的阻尼影响。

根据合理设计, 并结合式(12)绘制出了总混合阻尼系数随着电网电感变化的情况, 如图 6 所示。

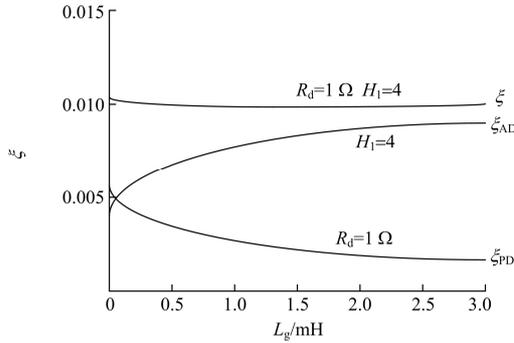


图 6 混合阻尼控制策略下阻尼系数与电网电感的关系  
Fig. 6 Relationship between damping coefficient and grid inductance under the hybrid damping control strategy

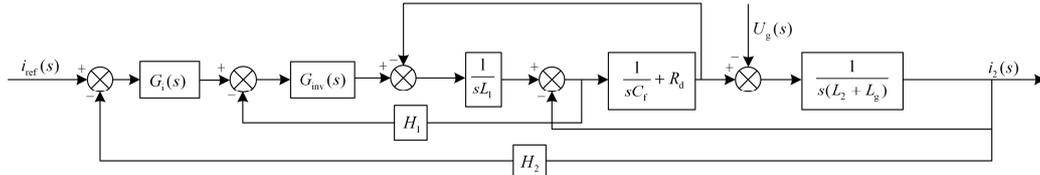


图 7 PDFI 控制下单相光伏逆变器的混合阻尼控制框图

Fig. 7 Hybrid damping control block diagram of single-phase photovoltaic inverter under the PDFI control

根据上文的分析, 结合式(2)和式(8), 式(14)可更改为

$$A = \frac{\hat{d}}{[as^3 + \hat{b}s^2 + cs](s - j\omega_0) + \hat{d}H_2} \quad (15)$$

$$B = \frac{\hat{e}(s - j\omega_0)}{[as^3 + \hat{b}s^2 + cs](s - j\omega_0) + \hat{d}H_2}$$

式中:  $\hat{b} = K_{pwm} H_1 (L_2 + L_g) C_f$ ;  $\hat{d} = K_{pwm} N(s)(R_d C_f s + 1)$ ;  
 $\hat{e} = L_1 C_f s^2 + K_{pwm} H_1 C_f s + R_d C_f s + 1$ 。

由式(13)可知, 并网电流  $i_2(s)$  由并网电流的参考电流  $i_{ref}(s)$  和电网电压  $U_g(s)$  共同决定。正是由于干扰量  $U_g(s)$  的存在, 并网电流  $i_2(s)$  无法精确跟踪

从图中可以看出, 总混合阻尼系数随着电网电感的变化而基本保持稳定, 这一结论证实了混合阻尼控制策略确实抑制了电网电感的加入对 LCL 滤波器的阻尼影响。

### 3 混合阻尼控制策略下的 PDFI 控制

本文将 LCL 滤波器的混合阻尼控制与并网电流的 PDFI 控制相结合来观察 PDFI 控制的作用效果。系统的控制框图如图 7 所示。其中,  $i_{ref}(s)$  为并网电流参考电流,  $H_2$  为并网电流反馈系数,  $G_f(s)$  则为 PDFI 控制器。

由图 7 可以知道, 系统的输出量是并网电流  $i_2(s)$ , 输入量是并网电流的参考电流  $i_{ref}(s)$ , 干扰量即是电网电压  $U_g(s)$ , 由此可列出  $i_2(s)$  的表达式:

$$i_2(s) = A i_{ref}(s) - B U_g(s) \quad (13)$$

在式(13)中,  $A$  与  $B$  分别为

$$A = \frac{d}{as^3 + bs^2 + cs + dH_2} \quad (14)$$

$$B = \frac{e}{as^3 + bs^2 + cs + dH_2}$$

其中:  $a = L_1(L_2 + L_g)C_f$ ;  $b = G_{inv}(s)H_1(L_2 + L_g)C_f$ ;  
 $c = (R_d C_f s + 1)(L_1 + L_2 + L_g)$ ;  $d = G_f(s)G_{inv}(s)(R_d C_f s + 1)$ ;  
 $e = L_1 C_f s^2 + G_{inv}(s)H_1 C_f s + R_d C_f s + 1$ 。

参考电流  $i_{ref}(s)$ , 从而使得光伏逆变系统的控制产生了一定的误差。加入了 PDFI 控制以后, 式(14)则变换为式(15)。由式(15)可知, 当 PDFI 控制器给定的  $\omega_0$  与输入量  $i_{ref}(s)$  和干扰量  $U_g(s)$  保持一致时,  $A=1$  且  $B=0$ 。这时, 式(13)就变为  $i_2(s) = i_{ref}(s)$ , 从而抑制了干扰量  $U_g(s)$  对逆变系统的影响, 即实现了对并网电流的精确控制。

### 4 仿真实验

根据图 7 的控制框图, 利用 Matlab 2012a 搭建了 PDFI 控制与混合阻尼控制相结合的光伏并网逆变系统的模型。系统的仿真模型主要有光伏阵列, 逆变器及其控制系统, LCL 滤波器及电网。仿真模

型的主要参数如下：直流母线电压 $U_{dc}$ 为 400 V，开关频率为 1.2 kHz，采用单极性倍频调制方式，电网电压 $U_g$ 为 311 V，基波频率为 50 Hz，逆变器侧电感 $L_1$ 为 2.8 mH，网侧电感 $L_2$ 为 0.56 mH，滤波电容 $C_f$ 为 8  $\mu$ F，阻尼电阻 $R_d$ 为 1  $\Omega$ ，电网电感 $L_g$ 为 1 mH，电容电流反馈系数 $H_1$ 为 4，并网电流反馈系数 $H_2$ 为 1。

图 8 所示为仿真模型运行后，电网电压与并网电流的仿真波形，从图形中可以看出，电网电压与并网电流同频同相，满足并网条件之一。这说明，混合阻尼策略在考虑到电网电感以后，系统输出稳定，也即说明，混合阻尼具有良好的电网适应性。

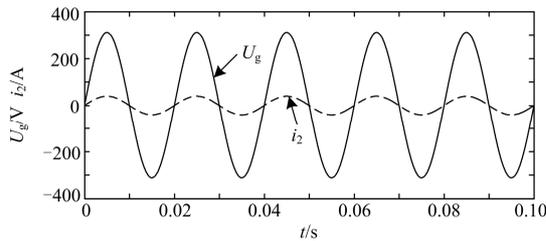


图 8 并网电流与电网电压的仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of the grid voltage and the grid current

图 9 所示为同等参数下，并网电流采用 PI 控制运行 0.035 s 后，加入反馈环节，即使用 PDFI 控制后的仿真波形。从波形中可以很清晰地看出，传统的 PI 控制无法使并网电流精确跟踪参考电流，控制误差比较明显。采用 PDFI 控制以后，并网电流大约在半个工频周期内进入稳态，实现了对并网电流的精确控制。

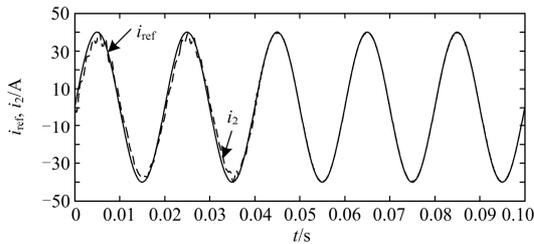


图 9 PI 控制与 PDFI 控制的仿真波形

Fig. 9 Simulation waveforms of the PI control and the PDFI control

图 10、图 11 为系统主要参量的仿真波形以及并网电流总谐波失真的 FTT 分析。从这两个波形可以看出，采用 PDFI 控制与混合阻尼控制的光伏并网逆变系统运行极为稳定，并且在两者的作用下，并网电流的总谐波失真减小至 0.32%，远低于并网

要求的 5%，大大满足了电能质量要求。

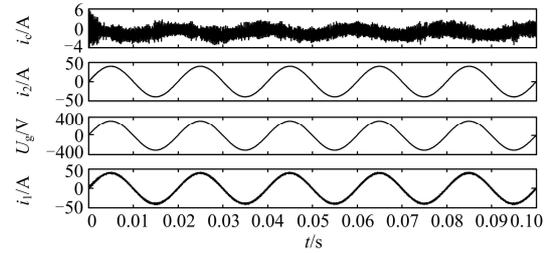


图 10 系统各主要参量的仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of the main parameters of the system

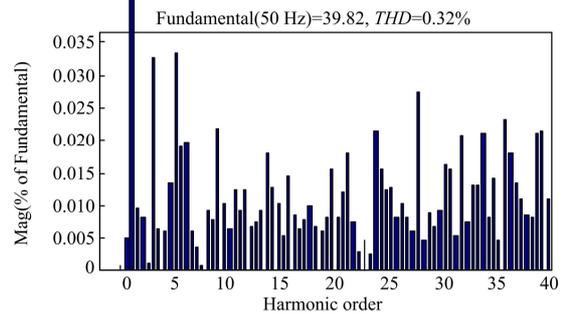


图 11 并网电流总谐波失真的 FTT 分析

Fig. 11 FTT analysis for the total harmonic distortion of the grid current

## 5 结论

本文通过分析 PDFI 控制的原理及实现方式，并网引入的电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响，提出了 PDFI 控制与混合阻尼控制相结合的单相光伏并网逆变系统的控制策略，并给出了该控制策略下的仿真验证结果，结果表明：PDFI 控制在 PI 控制的基础上增加了一个延迟反馈环节，可实现对并网电流的精确控制。引入的混合阻尼控制策略在一定程度上抑制了电网电感对 LCL 滤波器的阻尼影响；PDFI 控制与混合阻尼控制相结合使得系统运行稳定，并网电流与电网电压同频同相，并网电流总谐波失真极小，很好地满足了并网要求。由于本控制策略同时采用 PDFI 控制与混合阻尼控制，需要增加额外的传感器及阻尼电阻，对系统的能耗及成本确有影响，但良好的稳定性及出色的并网条件使得本控制策略具有一定的工程应用价值。

## 参考文献

[1] 胡殿刚, 张雪佼, 陈乃仕, 等. 新能源发电项目多维度后评价方法体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 10-17.  
HU Diangang, ZHANG Xuejiao, CHEN Naishi, et al. Research on multi-dimensional post evaluation methodology

- of new energy power generation projects[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 10-17.
- [2] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.  
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.
- [3] 贾林壮, 冯琳, 李国杰, 等. 基于 MMC 技术的光伏并网逆变器原理及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 78-85.  
JIA Linzhuang, FENG Lin, LI Guojie, et al. Research on the principle and simulation of grid-connected PV inverter based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 78-85.
- [4] 郭小强, 贾晓瑜, 王怀宝, 等. 三相并网逆变器静止坐标系零稳态误差电流控制分析及在线切换控制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 8-14.  
GUO Xiaoqiang, JIA Xiaoyu, WANG Huaibao, et al. Analysis and online transfer of stationary frame zero steady-state error current control for three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 8-14.
- [5] 杨俊伟, 史旺旺. 交流电流直接控制的单相 PWM 整流器非线性控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 114-118.  
YANG Junwei, SHI Wangwang. Nonlinear control strategy for direct AC current control in single-phase PWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 114-118.
- [6] 王德玉, 吴俊娟, 郭小强, 等. 单相光伏并网逆变器 PDFI 控制技术[J]. 电力电子技术, 2012, 46(5): 52-53.  
WANG Deyu, WU Junjuan, GUO Xiaoqiang, et al. Research on PDFI control for single-phase PV grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2012, 46(5): 52-53.
- [7] 陈新, 韦微, 胡雪峰, 等. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的研究及新型有源阻尼控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 71-79.  
CHEN Xin, WEI Zheng, HU Xuefeng, et al. Research on LCL filter in three-phase grid-connected inverter and novel active damping control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 71-79.
- [8] 韩刚, 蔡旭. LCL 并网变流器反馈阻尼控制方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 72-78.  
HAN Gang, CAI Xu. Study on feedback damping control methods of grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 72-78.
- [9] 彭咏龙, 黄潇潇, 李亚斌. 三相 BUCK 型 SVPWM 整流器 LC 振荡阻尼混合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 90-95.  
PENG Yonglong, HUANG Xiaoxiao, LI Yabin. Damping of LC oscillation using a hybrid combination approach for three-phase BUCK-type SVPWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 90-95.
- [10] 许泽铭, 谢少军, 唐婷. 弱电网下 LCL 滤波并网逆变器自适应电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4031-4039.  
XU Jinming, XIE Shaojun, TANG Ting. An adaptive current control for grid-connected LCL-filtered inverters in weak grid case[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4031-4039.
- [11] 雷一, 赵争鸣, 袁立强, 等. LCL 滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 36-40.  
LEI Yi, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Factors contributing to damping of grid-connected photovoltaic inverter with LCL filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 36-40.

收稿日期: 2015-08-23; 修回日期: 2015-12-05

作者简介:

杨秋霞(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为逆变器并网控制、电力系统控制; E-mail: yangqx\_fly@163.com

李坤(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏逆变器并网控制; E-mail: jkheaven@163.com

王虎(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网、故障穿越技术。E-mail: 748980475@qq.com

(编辑 姜新丽)