

DOI: 10.7667/PSPC170656

逆变器侧电流反馈的LCL型三相光伏并网逆变器解耦控制

高峰阳^{1,2}, 杜强¹, 乔焱¹, 强国栋¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了实现 LCL 型三相光伏并网逆变器 dq 轴的解耦控制, 同时提高系统的动态响应速度, 在同步旋转坐标系下, 提出一种适用于逆变器侧电流反馈的前馈解耦控制策略。并在电压外环中引入光伏阵列功率前馈、电流内环中引入电网电压前馈。视各耦合项为扰动, 采用闭环传递函数的求解方法以获取实现解耦控制的前馈系数, 同时分析了滤波器参数在发生变化时其对 dq 轴解耦效果的影响。通过 Matlab 建立系统仿真模型, 仿真结果表明: 所提解耦控制策略使 LCL 型三相光伏并网逆变器不仅实现了 dq 轴的解耦控制, 而且在保证强鲁棒性及高入网电流质量条件下具有良好的动、静态性能。

关键词: 光伏并网; LCL 滤波; 逆变器侧电流反馈; 解耦控制; 电网电压前馈; 功率前馈

Decoupling control strategy with inverter-side current feedback for LCL-type three-phase PV grid-connected inverter

GAO Fengyang^{1,2}, DU Qiang¹, QIAO Yao¹, QIANG Guodong¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Opto-technology and Intelligent Control of the Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to realize the decoupling control of dq axis for three-phase PV grid-connected system and speed up the system dynamic response speed, a decoupling control strategy is proposed in the synchronous rotating reference frame. Meanwhile, PV array power feed-forward and full grid-voltage feed-forward control are respectively introduced into the voltage outer loop and current inner loop. The coupling terms are considered as disturbances, and the feed-forward decoupling coefficients are obtained by solving the closed loop transfer function, and the decoupling effect of the dq axis is analyzed when the filter parameters change. The system simulation model is established by Matlab, the simulation results show the proposed control strategy makes the three-phase PV grid-connected inverter with LCL filter not only realize the decoupling control of dq axis, but also has good static and dynamic performance under the condition of the strong robustness and high grid current quality.

This work is supported by Science and Technology Support Project of Gansu Province (No. 1204GKCA038).

Key words: PV grid connected; LCL filter; inverter side current feedback; decoupling control; grid voltage feed-forward; power feed-forward

0 引言

在能源需求与环境保护的双重压力下, 以太阳能为代表的新能源发电技术已成为研究热点, 并在未来有相当可观的发展潜力^[1-2]。为获得较好的入网电流质量, 在逆变器与电网之间须采用 L、LCL 或

其他形式的滤波器^[3]以消除脉宽调制所产生的开关谐波。较 L 滤波器而言, LCL 滤波对高次谐波抑制效果好, 同时具有体积小、成本低的优点, 但 LCL 滤波器存在固有的高阶谐振现象, 使控制器的设计复杂化^[4]。为了克服 LCL 谐振, 已有文献将带有有源阻尼的控制方案应用于 LCL 滤波系统, 如分裂电容无源阻尼控制^[5-6]、有源阻尼比例谐振控制^[7-8]、有源阻尼重复控制^[9-10]、三/双/单闭环 PI 控制等^[11-16]。

基金项目: 甘肃省科技支撑计划项目资助(1204GKCA038)

对于三相并网逆变器控制而言, 同步旋转坐标系的控制器设计方便、PI 参数整定容易, 且具有有功和无功分量控制的解耦特性, 因此大多数选择同步旋转坐标系下的 PI 控制策略^[11]。文献[12]采用基于状态反馈的三环控制, 消除了 dq 轴之间的耦合, 但其结构复杂; 文献[13]采用滤波电容电流和网侧电流反馈的双闭环解耦控制, 但解耦时耦合项系数复杂, 计算量大; 文献[14]虽在控制策略中引入与被控量相对应的耦合补偿项, 但仅实现了 dq 轴的部分解耦, 同时所采用的网侧电流反馈控制影响了系统稳定性; 文献[15]指出逆变器侧电流反馈控制的系统稳定性极强, 且因只有一个电流环故其控制器参数容易设计; 在文献[15]的基础上, 文献[16]基于数字控制延时, 提出一种无需任何阻尼方案的 LCL 滤波一体化设计方法, 通过逆变器侧电流反馈即可实现高性能并网。文献[15-16]中逆变器侧电流反馈控制均以单相逆变器为控制对象, 针对三相逆变器, 还需进行 dq 轴解耦。

针对 LCL 滤波型三相光伏并网系统, 首先提出一种适用于逆变器侧电流反馈的解耦控制, 将 $d、q$ 轴中含有的 $q、d$ 轴信息作为扰动, 通过计算引入前馈系统的闭环传递函数确定各耦合项的解耦系数, 消除 q 轴对 d 轴、 d 轴对 q 轴的影响, 从而实现完全解耦。其次, 分析滤波器参数在发生变化时其所提解耦效果的影响。并在传统电压外环中引入光伏阵列输出功率前馈补偿作为电流内环的参考值, 同时引入电网电压全前馈降低电网电压背景次谐波对并网电流的影响。最后通过 Matlab 建立系统仿真模型, 验证所提控制策略的正确性。

1 LCL 型光伏并网逆变器结构及控制原理

LCL 滤波型三相光伏并网系统结构如图 1 所示。主要由光伏阵列 PV、直流稳压电容 C_{dc} 、三相并网逆变器、LCL 滤波器、三相电网及相应的控制系统构成。

系统的控制过程如下: ① 外环为直流链电压环, MPPT 算法计算得到光伏阵列最大功率点参考值, 其与直流母线实测值之差通过 PI 控制器实现直流母线电压稳定, 同时得到内环有功电流部分参考值; ② 功率前馈环通过采样光伏阵列输出电压、电流, 并通过离散傅里叶变化得到电网电压有效值, 从而得到另一部分有功电流参考值; ③ 将两部分有功电流参考值相加即得总的有功电流参考值, 同时根据系统无功需求来给定无功电流参考值, 将检测到的逆变器侧电流 i_{1abc} 、网侧电流 i_{2abc} 、电容电压

u_{Cabc} 及电网电压 e_{abc} 通过等量坐标变换得到 i_{1dq} 、 i_{2dq} 、 u_{Cdq} 及 e_{dq} , 通过 dq 轴前馈解耦控制与电网电压前馈控制来给定 SVPWM 的调制信号, 经 SVPWM 调制算法即可得逆变器 S_1 — S_6 的开关信号。通上述控制后, 便可实现在 LCL 型三相光伏并网逆变器的高功率因数并网。

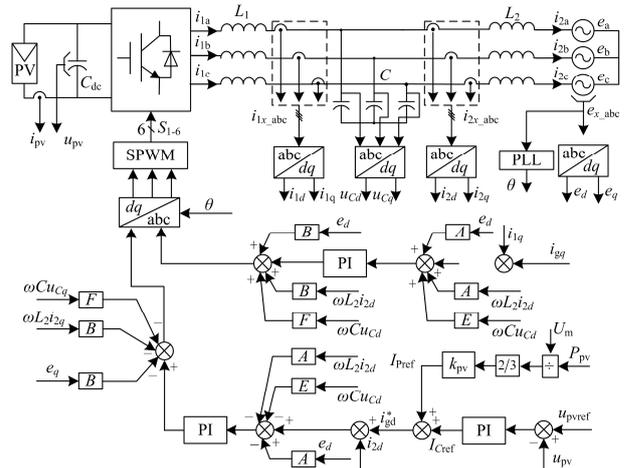


图 1 LCL 型光伏并网逆变器结构

Fig. 1 Structure of LCL-type grid-connected inverter

2 逆变器侧电流反馈的解耦控制

2.1 控制器前、后分别引入耦合项的解耦控制

若未采用解耦, 当内环采用 PI 控制时, 根据文献[13]LCL 并网逆变器的数学模型可得 d 轴下逆变器侧电流闭环控制策略如图 2 所示。

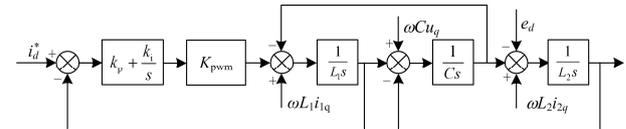


图 2 逆变器侧电流闭环控制策略框图

Fig. 2 Block diagram for current close-loop control strategy of grid-connected inverter side

图中, K_{pwm} 为逆变器等效比例系数, $k_p、k_i$ 分别为电流控制器的比例及积分系数。

从图 3 可以看到 $d、q$ 轴之间的物理量存在耦合, 以致无法实现对并网逆变器有功和无功功率的独立控制。因此需要找出一种适合于逆变器侧电流反馈的 LCL 并网逆变器的前馈解耦控制策略, 以消除 $d、q$ 轴的相互影响。采用前馈解耦时, 其位置只能是在控制器之前或者之后。当 $\omega L_2 i_{2q}$ 、 $\omega C u_{Cd}$ 及 $\omega L_1 i_{1q}$ 采用前馈解耦时, 在各个扰动量单独作用下系统的信号流图分别如图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 所示。

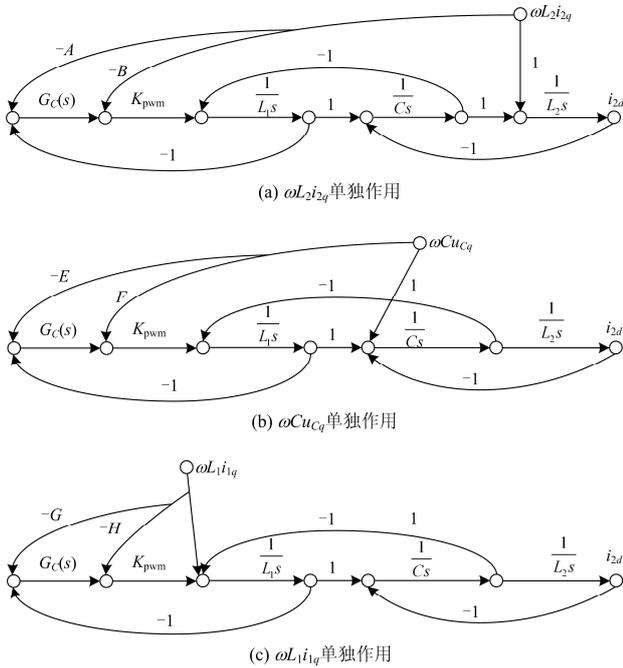


图 3 不同耦合项作用下系统的信号流图

Fig. 3 Signal flow graph under different coupling terms

由图 3(a)可知, 从源节点 $\omega L_2 i_{2q}$ 到阱节点 i_{2d} 有三条前向通道, 分别为 $p_1 = -AG_c(s)K_{pwm} \frac{1}{L_1 s} \frac{1}{Cs} \frac{1}{L_2 s}$ 、 $p_2 = -BK_{pwm} \frac{1}{L_1 s} \frac{1}{Cs} \frac{1}{L_2 s}$ 、 $p_3 = \frac{1}{L_2 s}$; 系统具有三个单独回路, 其值分别为: $L_a = -G_c(s)K_{pwm} \frac{1}{L_1 s}$ 、 $L_b = -\frac{1}{L_1 s} \frac{1}{Cs}$ 、 $L_c = -\frac{1}{L_2 s} \frac{1}{Cs}$, 且回路 L_a 与回路 L_c 互不接触, 同时除独立回路 a、b 与前向通道 p_3 互不接触外, 前向通道 p_1 、 p_2 与所有回路都接触, 故 $\Delta_1=1$ 、 $\Delta_2=1$ 、 $\Delta_3 = 1 + \frac{1}{L_1 s} \frac{1}{Cs} + G_c(s)K_{pwm} \frac{1}{L_1 s}$ 。

由梅逊公式可知, 该种工况下系统的传递函数为
$$\Phi_1(s) = \frac{K_{pwm}(k_p s + k_i)(Cs - A) + s[(1 + L_1 Cs^2) - BK_{pwm}]}{D(s)} \quad (1)$$

同理, 可以得到 $\omega CuCq$ 及 $\omega L_1 i_{1q}$ 采用前馈时, 在各自扰动作用下系统的传递函数分别为

$$\Phi_2(s) = \frac{s(L_1 s - K_{pwm} F) + K_{pwm}(k_p s + k_i)(1 - E)}{D(s)} \quad (2)$$

$$\Phi_3(s) = \frac{s(1 - K_{pwm} H) + GK_{pwm}(k_p s + k_i)}{D(s)} \quad (3)$$

式中,
$$D(s) = L_1 L_2 Cs^4 + K_{pwm} k_p L_2 Cs^3 + (L_1 + L_2 + K_{pwm} k_i L_2 C)s^2 + K_{pwm} k_p s + K_{pwm} k_i$$

从式(1)一式(3)可以看出, 若要完全消除 q 轴耦合量对 d 轴的影响, 则各耦合项的前馈系数需满足

$$\begin{cases} A = Cs \\ B = \frac{1 + L_1 Cs^2}{k_{pwm}} \end{cases} \begin{cases} E = 1 \\ F = \frac{L_1 s}{K_{pwm}} \end{cases} \begin{cases} G = 0 \\ H = 1 \end{cases} \quad (4)$$

由于 d 轴与 q 轴具有对偶性, 故式(4)所示的解耦系数同样适用消除 d 轴对 q 轴的解耦控制, 可见当各个耦合项的前馈系数满足式(4)时, d 轴并网电流可表示为

$$i_{2d} = \frac{k_p K_{pwm} s + k_i K_{pwm}}{D(s)} i_d^* - \frac{L_1 Cs^3 + k_p K_{pwm} Cs^2 + (k_i K_{pwm} C + 1)s}{D(s)} e_d \quad (5)$$

从式(5)中可以看出: 并网电流值除了与参考电流有关外, 还与电网电压相关。为进一步减小跟踪电流的稳态误差、削弱电网电压谐波畸变对并网电流的影响, 故采用电网电压前馈复合校正控制策略。

参考 d 、 q 轴解耦过程, 电网电压前馈的位置也只能是在电流控制器的前面或者后面, 由于 e_d 与 $\omega L_2 i_{2q}$ 所处的位置一致, 故参考 $\omega L_2 i_{2q}$ 的解耦过程, 可以得到电网电压前馈系数的值如式(4)中的 A 、 B 所示。此时电流内环的闭环传递函数为式(5)中参考电流的系数, 即

$$\Phi(s) = \frac{k_p K_{pwm} s + k_i K_{pwm}}{D(s)} \quad (6)$$

2.2 LCL 滤波器参数对前馈解耦效果的影响分析

假设 L'_1 、 L'_2 、 C' 为滤波器参数发生变化时的实际值, 以式(4)前馈系数下各耦合项所得的反馈值作为基准值, 可得到在滤波器参数发生变化时, 各耦合项的实际反馈值与基准值的误差幅值, 其标幺值分别如式(7)一式(9)所示。

$$E_{i_{2d} i_{2q}} = \left| \frac{(k_p s + k_i)s(C - C') + s^3(L_1 C - L'_1 C')}{(k_p s + k_i)Cs + s(1 + L_1 Cs^2)} \right| \quad (7)$$

$$E_{i_{2d} uCq} = \left| \frac{s^2(L_1 - L'_1)}{L_1 s^2} \right| = \left| 1 - \frac{L'_1}{L_1} \right| \quad (8)$$

$$E_{gi i_{1q}} = \frac{0}{s} = 0 \quad (9)$$

由式(7)一式(9)可得不同滤波器参数下, 各耦合项反馈幅值误差随频率变化的曲线如图 4 所示。可以看出: 所提解耦控制策略, 在滤波器参数发生变化时, 对于 $\omega L_1 i_{1q}$ 耦合项可实现完全解耦, 滤波

器参数变化对其无影响; 对于 $\omega L_2 i_{2q}$ 耦合项, 其幅值误差随角频率的增大而增大, 在低频段, 滤波器参数变化对反馈幅值误差影响不大, 在 20 次谐波内其最大值低于 30%, $\omega C u_{Cq}$ 的幅值误差最大为 10%, 可见所提控制策略在滤波器参数发生变化时, 很大程度上能够实现解耦控制。

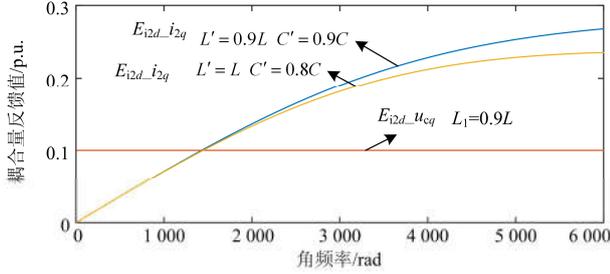


图 4 滤波器参数变化时的耦合项反馈值

Fig. 4 Feedback value of the coupling term when the filter parameters change

2.3 光伏电池功率前馈补偿

采用功率前馈时可以直接建立输入功率与输出电流之间的关系, 因为当外界环境发生变化时, 光伏电池输出功率也随之发生变化, 故可直接将光伏电池输出功率的变化信息传递给并网电流环, 从而减少了对直流电压环调节的依赖, 提高了整个系统对功率变化的动态响应性能^[17]。若不考虑逆变器及线路的有功损耗, 在电网电压定向的同步旋转坐标系下, 根据功率守恒可以得到稳态时 d 轴电流, 如式(10)所示。

$$i_d = \frac{2P_{pv}}{3e_d} = \frac{2u_{pv}i_{pv}}{3U_m} \quad (10)$$

引入功率前馈系数 k_{pv} , 可得到采用功率前馈时的电流给定值, 如式(11)所示。

$$I_{Pref} = \frac{2k_{pv}u_{pv}i_{pv}}{3U_m} \quad (11)$$

则入网参考电流值的幅值表达式如式(12)所示。

$$i_d^* = I_{Cref} + I_{Pref} \quad (12)$$

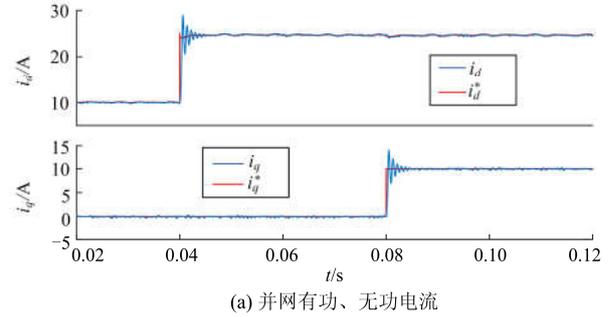
式中, I_{Cref} 为直流母线电压 PI 控制器的输出值。

3 Matlab 仿真与分析

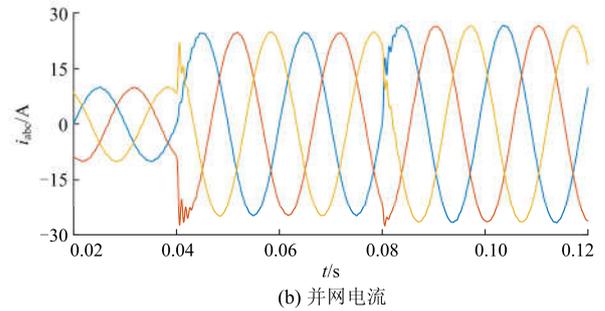
取 48 块 $P_{pax}=240\text{ W}$ 、 $U_{pmax}=30\text{ V}$ 的光伏电池组成 24 串、2 并的光伏电池阵列; 直流侧滤波电容值 $C_{dc}=2\ 000\ \mu\text{F}$; LCL 滤波器滤波电感与电容分别取值为 $L_1=1\text{ mH}$, $L_2=2\text{ mH}$, $C=20\ \mu\text{F}$; 开关频率为 10 kHz ; 电网电压为 $380\text{ V}/50\text{ Hz}$, 且含有 5 V 的 5

次和 7 次背景次谐波。

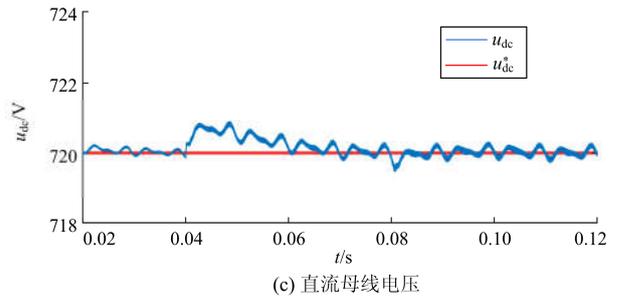
工况 1: 取功率前馈系数 $k_{pv}=0.9$, 设置直流母线参考电压为 720 V , 保持 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 不变的情况下, 分别在 $0.02\sim 0.04\text{ s}$ 与 $0.06\sim 0.14\text{ s}$ 时间段内设置光照强度为 600 W/m^2 、 $1\ 000\text{ W/m}^2$; 在 $0.02\sim 0.1\text{ s}$ 内保持无功电流参考值为 0 A ; 在 $0.08\sim 0.14\text{ s}$ 内无功电流参考值设为 10 A 。在上述工况下对系统进行仿真, 其结果如图 5 所示。



(a) 并网有功、无功电流



(b) 并网电流



(c) 直流母线电压

图 5 带有功率前馈的解耦控制仿真结果

Fig. 5 Simulation results of decoupling control with power feed-forward

图 5(a)为并网电流 d 、 q 轴分量, 可以看到: 当光照强度上升时, 有功电流参考值发生变化, 从而使得入网有功电流发生变化; 而无功电流则始终处于 0 值附近, 并没有发生突变; 当无功电流参考值发生变化时, 无功电流值在突变过程中存在一定振荡, 而有功电流值却保持恒定。图 5(b)为并网电流波形, 可以看到其接近正弦波, 通过 FFT 工具得到并网电流 THD 为 0.65%, 远小于 IEEE 规定的谐波

需低于 5% 的标准。图 5(c) 为直流母线电压波形，其暂态超调较小不超过 1 V，可认为到达稳态。

工况 2：保持工况 1 的条件，改变实际滤波器的参数，分别将电感 L_1 变为原来的 90%，电容 C 变为原来的 80% 进行仿真。

图 6 为滤波器参数发生变化时的 d 、 q 轴电流图，可以看到：当有功及无功电流发生突变时，对应的无功及有功电流并没有发生相应的振荡，只是无功电流出现了大约 0.3 A 的跟踪误差。由此可见，当滤波器参数发生变化对所提解耦控制效果影响不大。

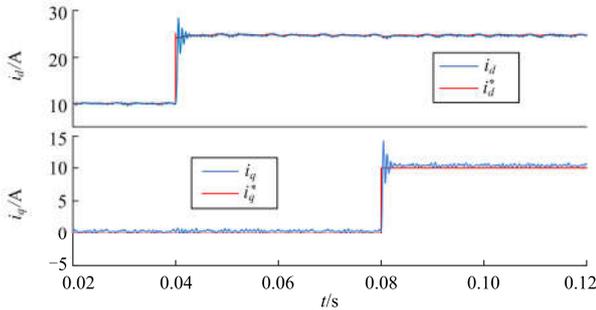


图 6 滤波器参数变化时的 d 、 q 轴电流

Fig. 6 dq axis current when the filter parameters change

工况 3：未采用解耦控制，有功、无功电流参考值变化与工况 1 一致，此时 dq 轴电流的波形如图 7 所示。

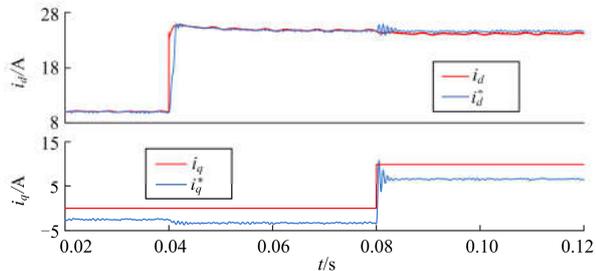


图 7 未采用解耦控制的 dq 轴电流

Fig. 7 dq axis current under the control without decoupling

从图 7 可以看到：当未采用解耦控制时，无功电流出现跟踪误差，即在 0.02~0.04 s 时间段内无功电流给定值为 0 A，而实测值为 -2.5 A。在 0.04 s 光照强度发生阶跃时，有功电流发生突变，无功电流值也随之变化到了 -3.4 A。在 0.08 s 时无功电流发生变化，此时有功电流也会有振荡，并且在稳态时有功电流约有 0.15 A 的误差，无功电流约有 3.2 A 的误差。

工况 4：将光伏电池阵列的功率前馈补偿系数置零，在 0.06 s 时设置光照强度从 600 W/m^2 变为 1000 W/m^2 ，可得到直流母线电压波形如图 8 所示。

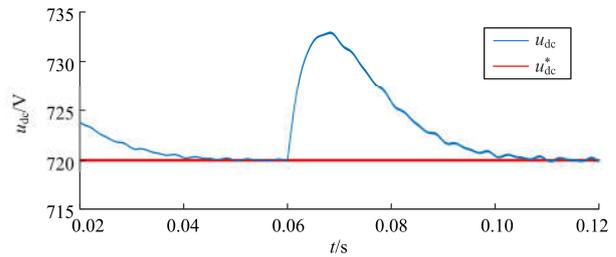


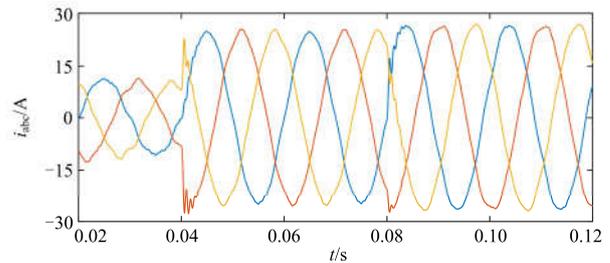
图 8 未采用功率前馈控制的直流母线电压

Fig. 8 DC bus voltage under the control without power feed-forward

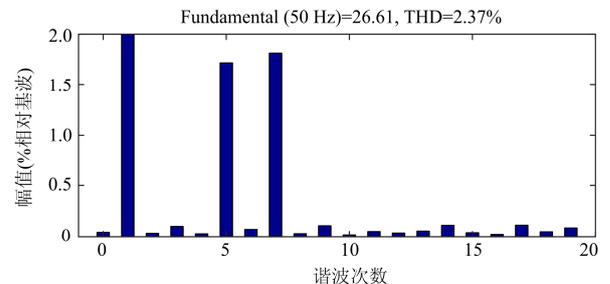
从图 8 可以看到：在未采用功率前馈控制的条件下，当光照强度变化时，整个暂态过程约为 0.04 s，直流母线电压的超调高达 13 V 左右，远远高于采用功率前馈时的 1 V，可见采用功率前馈可加快直流侧的动态响应速度，减小直流母线超调，以防止直流母线电压崩溃。

工况 5：未采用电网电压前馈，有功、无功电流变化与工况 1 一致。

图 9(a) 为无电网电压前馈解耦控制下的并网电流波形，可以看到：并网电流波形明显发生畸变；图 9(b) 为电流频谱图，由于电网电压存在 5 次及 7 次谐波的影响，使得并网电流中含有与之对应的背景次谐波，且并网电流波形的畸变率随电网电压谐波含量的升高而升高。



(a) 并网电流



(b) 并网电流 THD

图 9 无电网电压前馈控制下的仿真结果

Fig. 9 Simulation results of decoupling control without grid voltage feed-forward

4 结论

提出一种带有功率前馈的适用于逆变器侧电流反馈的LCL滤波型三相光伏并网逆变器控制策略, 得出如下结论:

1) 在各个耦合项中引入前馈, 实现了LCL型三相光伏并网逆变器 d 、 q 轴的解耦控制。该解耦控制策略不仅有效消除了有功分量与无功分量间的耦合影响, 实现了无静差跟踪与高入网功率因数, 而且对滤波器的参数变化具有强抵抗力, 即在滤波器参数发生变化时, 对所提解耦控制策略影响较小。

2) 采用光伏阵列功率前馈可以加快系统的动态响应速度, 减小直流母线电压的超调。采用电网电压前馈时可以有效削弱电网电压畸变对系统的影响, 从而使得并网电流接近于正弦波, 即谐波畸变率远远低于并网标准。

3) 将所提解耦控制策略与电网电压前馈及光伏阵列功率前馈补偿相结合, 可以使系统有效实现高功率因数并网, 同时具有较强的鲁棒性及良好的动、静态性能。

参考文献

- [1] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 29-39. DOI 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [2] 郭明亮, 戴朝华, 邓惠文, 等. 基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 56-61.
WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, et al. A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 56-61.
- [3] 金亮亮, 周荔丹, 姚钢, 等. 适用于并网逆变器的新型LCL滤波器[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 1-8.
JIN Liangliang, ZHOU Lidan, YAO Gang, et al. A novel LCL filter adopted in grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 1-8.
- [4] 许津铭, 谢少军, 张斌锋. 分布式发电系统中LCL滤波并网逆变器电流控制研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4153-4166.
XU Jinming, XIE Shaojun, ZHANG Binpeng. Overview of current control techniques for grid-connected inverters with LCL filters in distributed power generation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4153-4166.
- [5] 王海松, 王晗, 张建文, 等. LCL型并网逆变器的分裂电容无源阻尼控制[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 895-902.
WANG Haisong, WANG Han, ZHANG Jianwen, et al. Split-capacitor passive damping control for LCL grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 895-902.
- [6] 庄超, 叶永强, 赵强松, 等. 基于分裂电容法的LCL并网逆变器控制策略分析与改进[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 85-93.
ZHUANG Chao, YE Yongqiang, ZHAO Qiangsong, et al. Analysis and improvement of the control strategy of LCL grid-connected inverter based on split-capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 85-93.
- [7] 徐飞, 汤雨, 谷伟. 弱电网条件下LCL型并网逆变器谐振前馈控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4970-4979.
XU Fei, TANG Yu, GU Wei. Resonant feedforward control strategy for LCL-type grid-connected inverters in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4970-4979.
- [8] 雷亚雄, 李建文, 李永刚. 基于准PR调节器电流双闭环LCL三相并网逆变器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 44-50.
LEI Yaxiong, LI Jianwen, LI Yonggang. Control strategy of three-phase LCL grid-connected inverter based on quasi-PR adjuster[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 44-50.
- [9] 靳伟, 李永丽, 孙广宇. 基于有源阻尼的并网逆变器电流内环 H_∞ 重复控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4685-4693.
JIN Wei, LI Yongli, SUN Guangyu. H_∞ repetitive current controllers for grid-connected inverters based on active damping[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4685-4693.
- [10] 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.
- [11] 刘文军, 周龙, 陈剑, 等. LCL并网逆变器的电流双闭环控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 52-57.
LIU Wenjun, ZHOU Long, CHEN Jian, et al. Control method for grid-connected inverter with LCL filter by employing dual current closed-loops[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 52-57.

- [12] 屈克庆, 李文旗, 叶天凯, 等. 基于状态反馈的LCL型逆变器解耦控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 130-138.
QU Keqing, LI Wenqi, YE Tiankai, et al. State feedback based decoupling control strategy for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 130-138.
- [13] 彭秋波, 盘宏斌, 刘勇, 等. LCL型三相并网逆变器双闭环解耦控制器设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 103-110.
PENG Qiubo, PAN Hongbin, LIU Yong, et al. Design of dual-loop decoupling controller in LCL three-phase grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 103-110.
- [14] 包献文, 卓放, 谭佩喧. 三相LCL型并网逆变器的模型分析及解耦控制[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 44-49.
BAO Xianwen, ZHUO Fang, TAN Peixuan. Model analysis and decouple control strategy of three-phase grid-connected inverter with an LCL filter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 44-49.
- [15] 吴云亚, 谢少军, 阚加荣, 等. 逆变器侧电流反馈的LCL并网逆变器电网电压前馈控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 54-60.
WU Yunya, XIE Shaojun, KAN Jiarong, et al. A full grid voltage feed-forward control strategy with inverter-side current feedback for LCL grid-connected inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 54-60.
- [16] 许津铭, 季林, 葛小伟, 等. 计及逆变器侧电流反馈影响的LCL滤波器参数优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4656-4664.
XU Jinming, JI Lin, GE Xiaowei, et al. LCL-filter optimization design with consideration of inverter-side current feedback control impacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4656-4664.
- [17] 沈瑶, 罗安, 陈燕东, 等. 基于功率前馈的光伏并网控制方法及稳定性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2449-2454.
SHEN Yao, LUO An, CHEN Yandong, et al. A power feedforward based control approach for grid-connection of photovoltaic generation and its stability analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2449-2454.

收稿日期: 2017-05-04; 修回日期: 2017-09-21

作者简介:

高锋阳(1970—), 男, 副教授, 研究方向为大功率电源与新能源发电系统; E-mail: 329365048@qq.com

杜强(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与储能技术。E-mail: duq0423@163.com

(编辑 葛艳娜)