

不平衡电压下并网逆变器的控制策略研究

李冬辉, 田兰叶, 姚乐乐, 董 娜

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘 要: 不平衡电压下并网电流的质量是并网逆变器重要的性能指标。使用不平衡电压下并网逆变器的数学模型和瞬时功率理论,推导出三相平衡电流的参考指令;进而使用基于复矢量滤波器的正负序分离方法得到电网正序电压;最后对多步预测的有限控制集模型预测控制算法(finite control set model predictive control with multi-step prediction, FCS-MPCMSP)进行改进,奇数周期采用传统算法,针对传统算法忽略模型误差的问题采用反馈校正的思想对其进行补偿,偶数周期同时选取最优和次优电压矢量对应的开关状态,再进一步求取2个开关状态中的最优开关状态,减少算法的计算量。仿真和实验结果验证本文算法的有效性。

关键词: 模型预测控制; 电网电压不平衡; 逆变器; 有限控制集

中图分类号: TM464

文献标识码: A

0 引 言

并网逆变器(grid-connected inverter, GCI)作为太阳能等一些清洁能源与电网的接口已经到广泛应用^[1]。因 GCI 与电网直接相连,电网故障会影响其性能,因此研究不平衡电网下 GCI 的控制技术至关重要。

在对不平衡电网下 GCI 的研究中,已有文献通过在旋转坐标系中使用 PI 控制^[2]或直接功率控制^[3]来实现输出功率或波形稳定。但 PI 控制器在复杂的坐标变换^[4]中会引起延时,年 珩等^[5]为解决此问题提出实现不同控制目标的并网电流参考指令计算方法,省略了提取正负序并网电流的环节以减少时间延时。

有限控制集模型预测控制(finite control set-MPC, FCS-MPC)具有概念直观、控制灵活、无需调制器等优点,被广泛应用于各种电力电子变换器中。文献[6]对不平衡电网下 FCS-MPC 和 PI 控制在对并网电流控制方面进行对比,得出 FCS-MPC 效果更好的结论。文献[7]对使用枚举法选择最优开关状态计算量大的缺点进行改进,只需要一次预测就能得到最优开关状态。

本文首先使用不平衡电网电压下并网逆变器

的数学模型和瞬时功率基础理论,推导出三相平衡电流的参考指令,进而使用基于复矢量滤波器的正负序分量分离方法得到电网正序电压,然后对 FCS-MPCMSP 算法进行改进,并通过仿真和实验结果验证了本文所提算法的有效性。

1 并网电流参考指令

图 1 为三相并网逆变器的拓扑结构。 L 是滤波电感, R 是电阻, U_{dc} 表示直流母线电压, $e_a \sim e_c$ 分别表示三相电网电压。

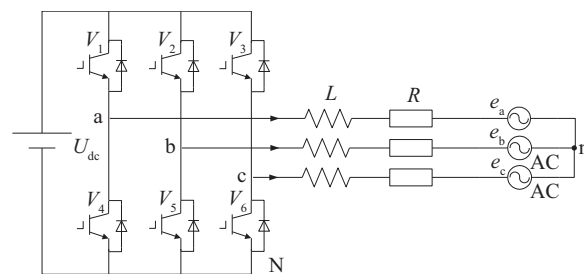


图1 三相并网逆变器

Fig. 1 Three-phase grid-connected inverters

为便于分析,忽略三相电网电压和并网电流的谐波分量,只考虑基波分量,电网电压矢量 \mathbf{E} 和并网电流矢量 \mathbf{I} 可表示为:

收稿日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61403274)

通信作者: 李冬辉(1962—), 男, 博士、教授, 主要从事智能控制、电力电子技术方面的研究。lidonghui@tju.edu.cn

$$\begin{bmatrix} E_a & E_b & E_c \end{bmatrix}^T = E_m^+ \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \varphi_p) \\ \sin(\omega_0 t + \varphi_p - 2\pi/3) \\ \sin(\omega_0 t + \varphi_p + 2\pi/3) \end{bmatrix} + E_m^- \begin{bmatrix} \sin(-\omega_0 t + \varphi_n) \\ \sin(-\omega_0 t + \varphi_n - 2\pi/3) \\ \sin(-\omega_0 t + \varphi_n + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}^T = I_m^+ \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t + \theta_p) \\ \sin(\omega_0 t + \theta_p - 2\pi/3) \\ \sin(\omega_0 t + \theta_p + 2\pi/3) \end{bmatrix} + I_m^- \begin{bmatrix} \sin(-\omega_0 t + \theta_n) \\ \sin(-\omega_0 t + \theta_n - 2\pi/3) \\ \sin(-\omega_0 t + \theta_n + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, E_m^+ 、 I_m^+ 、 φ_p 、 θ_p ——正序电网电压和并网电流的峰值和相位; E_m^- 、 I_m^- 、 φ_n 、 θ_n ——负序电网电压和并网电流的峰值和相位。

当三相电网不平衡时,可推导出 GCI 的瞬时有功、无功功率表达式:

$$\begin{aligned} P(t) &= P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \\ Q(t) &= Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_0 \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = 1.5 \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ & e_d^- & e_q^- \\ e_d^- & e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \\ e_q^- & -e_d^- & +e_q^+ & e_d^+ \\ e_q^+ & -e_d^+ & e_q^- & -e_d^- \\ e_q^- & -e_d^- & e_q^+ & -e_d^+ \\ -e_d^- & -e_q^- & e_d^+ & e_q^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, e 、 i ——电网电压矢量 \mathbf{E} 和电流矢量 \mathbf{I} 的瞬时量。

当电网不平衡时,并网逆变器有 4 种不同控制目标。本文使并网电流平衡正弦,令 $i_d^- = i_q^- = 0$, $P_0 = P_0^*$, $Q_0 = Q_0^*$ 得并网电流参考指令为:

$$\begin{bmatrix} i_d^{*+} \\ i_q^{*+} \end{bmatrix} = \frac{2}{3[(e_d^+)^2 + (e_q^+)^2]} \begin{bmatrix} e_d^+ & e_q^+ \\ e_q^+ & -e_d^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0^* \\ Q_0^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $(e_d^+)^2 + (e_q^+)^2 \neq 0$; P_0^* 、 Q_0^* ——平均有功功率、平均无功功率指令。

为使 GCI 能够以单位功率因数运行,令平均无功功率指令 Q_0^* 为零。由式(5)可知,想要得到并网电流的参考指令,本文还需要得到电网电压的正序分量,目前常用的方法有:基于低通滤波器、基于正交分量法、基于解耦的双同步旋转坐标系法(decoupled double synchronous reference frame, DDSRF)。李葛亮等^[8]提出一种适用于电网不平衡下带有降阶谐振调节器的正负序分离方法,需要对积分系数 K 进行调节,过比较复杂。文献[9]提出

一种基于自适应观测器的正负序分离检测方法,但其分离出的正负序分量含有谐波,会对电网的频率和相位造成影响。

在此基础上,本文采用基于复矢量滤波器的正负序分量计算方法,得到电网电压的正序分量,用于计算并网电流参考指令,原理图如图 2 所示。

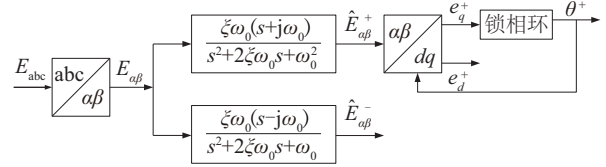


图2 电网电压正负序分离

Fig. 2 Detection method for positive and negative

以传递函数 $F_1(s)$ 为例:

$$F_1(s) = \frac{\kappa(s + j\omega_0)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6)$$

式中, κ ——增益, $\kappa = \xi\omega_0$; ξ ——阻尼比, $\xi = 0.707$; ω_0 ——基波角频率; ω_n ——自然角频率, 令 $\omega_n = \omega_0$ 。

当 $s = j\omega_0$ 时, $F_1(j\omega_0) = 1$; 而当 $s = -j\omega_0$ 时, $F_1(-j\omega_0) = 0$ 。因此当电网电压 $E_{dq}(s)$ 不平衡时, $F_1(s)$ 可完全得到电网电压正序分量,而电网电压负序分量被阻止。同理, $F_2(s)$ 可完全得到电网电压负序分量,而电网电压正序分量被阻止。

2 FCS-MPC 算法

2.1 三相并网逆变器的数学模型

文献[10]给出了如图 1 所示的三相并网逆变器的预测模型:

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L})i_\alpha(k) + \frac{T_s}{L}[(u_\alpha(k) - e_\alpha(k))] \\ i_\beta(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L})i_\beta(k) + \frac{T_s}{L}[(u_\beta(k) - e_\beta(k))] \end{cases} \quad (7)$$

式中, T_s ——采样周期。

u_α 、 u_β 分别为:

$$\begin{cases} u_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{dc} [V_a - \frac{1}{2}(V_b + V_c)] \\ u_\beta = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{dc} (V_b - V_c) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $V_a \sim V_c$ ——GCI 的开关状态; U_{dc} ——直流侧母线电压。

2.2 改进的 FCS-MPCMS

FCS-MPC 作为一种最优化的控制方法,可以将对电力电子变换器的控制转换成对其有限开关状态的控制,根据当前时刻的状态变量和开关状态来预测未来某一时刻的开关状态,根据目标函数选择使系统性能最优的开关状态作用于变换器。

算法的基本原理为:假设系统的采样周期为 T_s ,由上文可知,系统有 8 种开关行为,分别表示为 $S_n(n=1, \dots, 8)$ 。该算法在 t_k 时刻采样得到变量 $i(k)$,利用变量 $i(k)$ 和预测模型函数 f 可得到系统 t_k 时刻所有预测结果 $i_n^p(k+1)=f\{i(k), S_n\}$, $n=1, \dots, 8$ 。为判断所有预测结果中的最优开关状态,需定义一个价值函数 f_g ,由参考变量 $i^*(k+1)$ 和预测结果 $i_n^p(k+1)$ 表示,即 $f_g=f\{i^*(k+1), i_n^p(k+1)\}$, $n=1, \dots, 8$,通常选取二者差的二次方作为价值函数,即 $f_g=[i^*(k+1)-i_n^p(k+1)]^2$ 。最后在所有不同的价值函数值中挑选出最小的价值函数值,将其对应的开关状态作用到下一采样周期。

然而在实际工程中,对电网电压和电流进行采样的过程消耗了一定时间,有的文献忽略这段时间^[11],考虑到这段时间不能忽略,因此需要在 t_k 时刻给出 t_{k+1} 时刻的开关状态。为此本文采用 2 个采样周期的预测值对采样和计算时间进行补偿,即在 t_k 时刻设开关状态 $S(t_k)$ 已由上一时刻得到,由预测模型 f 得到 $i^p(k+1)$ 。再使用上述算法得到在 t_{k+2} 时刻使价值函数最小的开关状态 $S(t_{k+1})$,将其作用到下一采样周期。

文献[12]阐述了传统 FCS-MPC 存在保守性的原因:算法只是使所选控制量在一个周期内最优,未考虑多个周期内的最优性;只考虑最优开关函数组合,忽略了次优开关函数组合。提出降低算法保守性的 FCS-MPCMS 算法。

本文在 FCS-MPCMS 算法基础上进行改进,即将算法的奇数周期和偶数周期做不同处理,奇数周期采用传统 FCS-MPC 算法,偶数周期采用 FCS-MPCMS 算法,即奇数周期采用上述传统算法,偶数周期同时选取最优和次优开关状态,再进一步选取 2 个开关状态中的最优开关。同时选取使电压矢量最接近理想电压矢量开关状态的方法,将 8 次

预测函数计算变成一次电压计算,减少计算量。本文算法不仅可在一定程度上降低算法的保守性,且比 FCS-MPCMS 算法减少了计算量和运行时间。

算法具体流程为:

1) 设 t_k 时刻为奇数采样周期,在 t_k 时刻采样电网电压 $e_{abc}(k)$ 和并网电流 $i_{abc}(k)$ 对并网电流进行 3/2 变换得到 $i_{\alpha\beta}$ 。由上文使用的方法将电网电压分离得到 e_d^+ 、 e_q^+ ,并根据式(5)和 2r/2s 变换(2r 代表两相旋转坐标,2s 代表两相静止坐标),得到电流参考值 i_α^* 、 i_β^* 。

2) 由预测模型 $f\{i(k), S(t_k)\}$ 计算出 $i^p(k+1)$, 即:

$$i^p(k+1) = (1 - \frac{RT_s}{L})i(k) + \frac{T_s}{L}[u(k) - e(k)] \quad (9)$$

传统算法认为预测模型与实际系统完全一致,忽略了系统模型误差^[13],本文采用并网逆变器输出电流的实际值与预测值的差值对模型误差进行补偿,可得:

$$i^{pc}(k+1) = i^p(k+1) + \eta[i^{pc}(k) - i(k)] \quad (10)$$

式中, η ——补偿系数。

3) 由预测模型得到系统 t_{k+1} 时刻所有的预测结果:

$$i_n^{pc}(k+2) = (1 - \frac{RT_s}{L})i^{pc}(k+1) + \frac{T_s}{L}[u(k+1) - e(k+1)] \quad (11)$$

传统的 FCS-MPC 算法是选取使电流预测值最接近参考值的开关状态,本文算法选取使电压矢量最接近理想电压矢量开关状态的方法,只需计算一次电压和 8 次价值函数,计算量减少。文献[14]提出如果使应用于 t_{k+1} 时刻的开关状态对应的电压矢量与 $u^*(k+1)$ 相等,就能使 t_{k+2} 时刻预测电流 $i_n^{pc}(k+2)$ 与 $i^*(k+2)$ 相等,因此得:

$$u^*(k+1) = \frac{L}{T_s}i^*(k+2) + e(k+1) + \left(R - \frac{R}{T_s}\right)i^{pc}(k+1) \quad (12)$$

式中, $i^*(k+2) = i^*(k)e^{j2\omega T_s}$; $e(k+1) = e(k)e^{j\omega T_s}$ 。

4) 求解价值函数,将使函数值最小的开关状态作用到下一采样周期。在传统价值函数中加入 λn_c 项,用来降低开关器件的动作次数,减少损耗。

则价值函数为:

$$f_g = [u_\alpha^*(k+1) - u_\alpha(k+1)]^2 + [u_\beta^*(k+1) - u_\beta(k+1)]^2 + \lambda n_c \quad (13)$$

式中, λ ——权重系数; n_c ——开关变化次数。

5) t_{k+1} 时刻为偶数采样周期, 与 1) 步过程相同, 得到电流参考值 i_α^* 、 i_β^* 。

6) 步与 2) 步过程相同, 采用并网逆变器输出电流的实际值与预测值的差值对模型误差进行补偿, 得到预测模型。

7) 步与 3) 步过程相同, 选取使电压矢量最接近理想电压矢量开关状态的方法, 得到新的预测模型。

8) 求解价值函数, 选取使价值函数最小和次小

的电压矢量 $u_{m1}(k+2)$ 和 $u_{m2}(k+2)$, 其中 $m1$ 、 $m2 \in \{0, \dots, 7\}$ 及其对应开关状态 $S_{m1}(k+2)$ 和 $S_{m2}(k+2)$ 。

9) 根据式 (12) 和预测模型求取最小和次小电压矢量对应的理想电压矢量 $u_{m1}^*(k+3)$ 、 $u_{m2}^*(k+3)$ 。

10) 分别求取价值函数, 选择使价值函数最小的电压矢量 $u_{m1i}^*(k+3)$ 或者 $u_{m2i}^*(k+3)$, 其中 $i \in \{0, \dots, 7\}$, 并将其对应的开关状态作用于下一采样周期。

具体算法流程如图 3 所示。

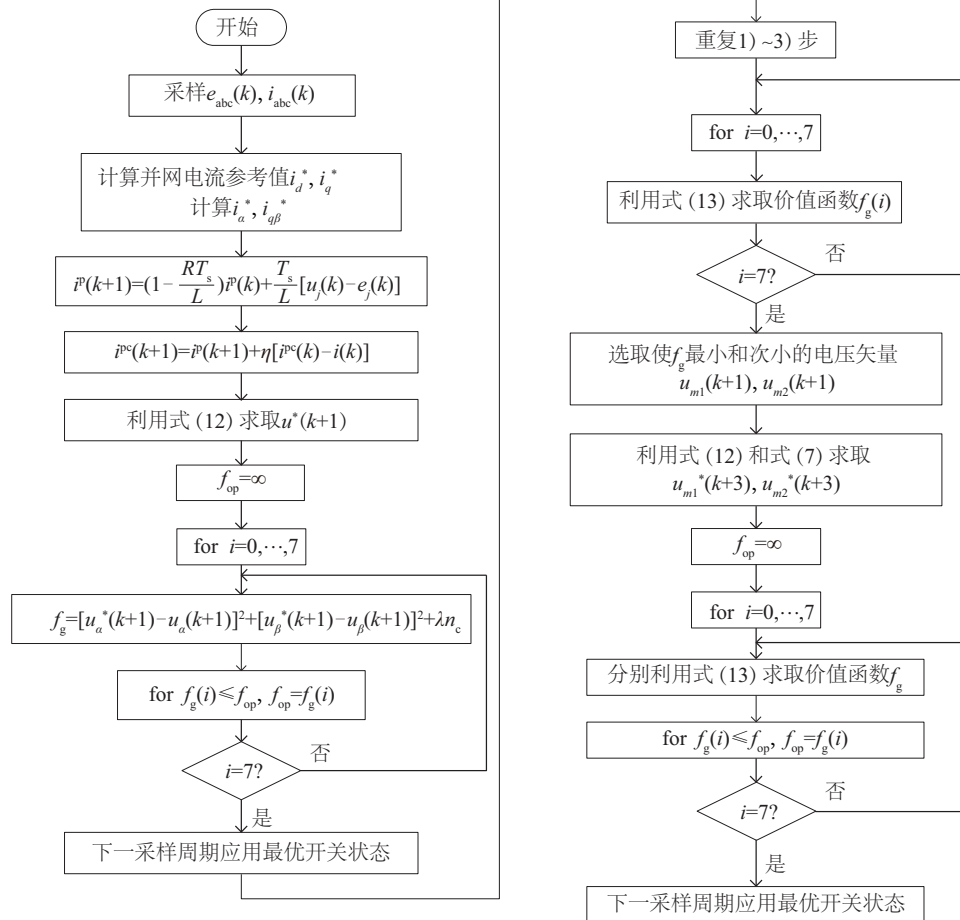


图3 控制流程图

Fig. 3 Control flow

2.3 算法的计算量分析

由 2.2 节内容可知, 改进 FCS-MPCMS 算法在奇数控制周期内的计算量为 1 次调用预测函数, 1 次计算理想电压矢量, 8 次调用价值函数; 在偶数控制周期内的计算量为 3 次调用预测函数, 5 次计算理想电压矢量, 24 次调用价值函数。而 FCS-

MPCMS 算法, 在奇数和偶数周期的计算量都为 25 次调用预测函数, 0 次计算理想电压矢量, 24 次调用价值函数。理论上改进 FCS-MPCMS 算法的计算量要少于 FCS-MPCMS 算法, 当并网逆变器的有效开关函数的组合越多时效果越明显。具体结论如表 1 所示。

表1 算法计算量比较

Table 1 Calculation comparison of different algorithms

算法	周期数	$f[i,s]$	u	f_g
FCS-	奇数	$3n+1$	0	$3n$
MPCMS	偶数	$3n+1$	0	$3n$
改进FCS-	奇数	1	1	n
MPCMS	偶数	3	5	$3n$

注： n —并网逆变器的有效开关函数的组合数； $f[i,s]$ —预测函数； u —理想电压矢量； f_g —价值函数。

3 仿真研究

为验证本文提出改进 FCS-MPCMS 算法的有效性,在 Matlab2010b/Simulink 环境下,搭建三相并网逆变器拓扑结构仿真模型,其中电路主要参数:有功功率 2 kW,电网电压峰值 100 V,采样周期 33 μ s。采用改进的 FCS-MPCMS 算法进行仿真,并与 FCS-MPCMS 算法进行对比。

图 4 为三相电网电压波形,可看出当 $t=0.1$ s 时,a 相电网电压幅值下降了 20%,电网电压不再是平衡的正弦波。

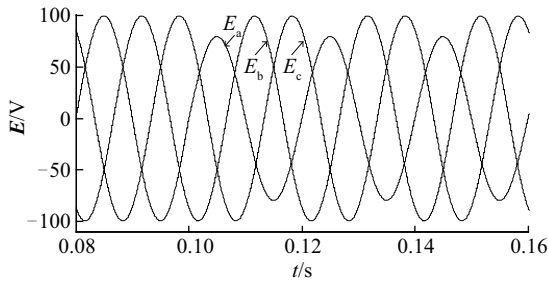


图4 三相电网电压

Fig. 4 Three-phase grid voltage

图 5 为采用图 2 方法分离得到的电网电压正负序分量。用于式(5)计算并网电流参考指令。

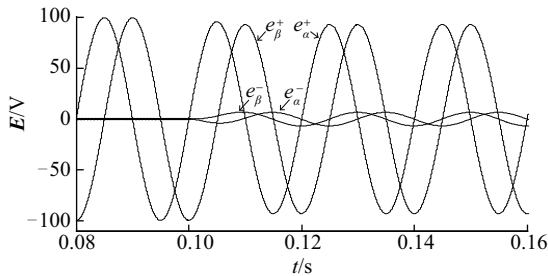


图5 电网电压正负序分量

Fig. 5 Positive and negative sequence grid voltage

采用改进 FCS-MPCMS 算法,得到图 6 所示 a 相电网电压和并网电流图。可看出 A 相并网电流的波形稳定,a 相电流 $THD=0.67\%$ 。并网逆变器单位功率因数运行。

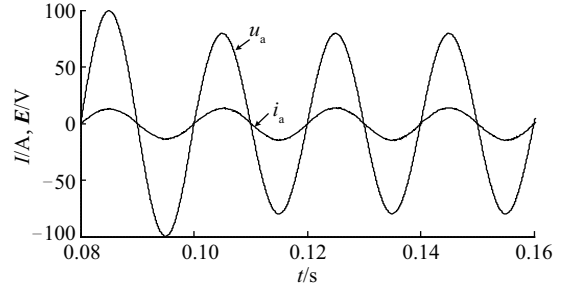


图6 A相电压和电流

Fig. 6 A phase voltage and current

图 7 为改进 FCS-MPCMS 算法和 FCS-MPCMS 算法在 100 个周期内的运行时间对比图。可看出本文算法能有效减少算法的计算量,从而减少算法的运行时间。

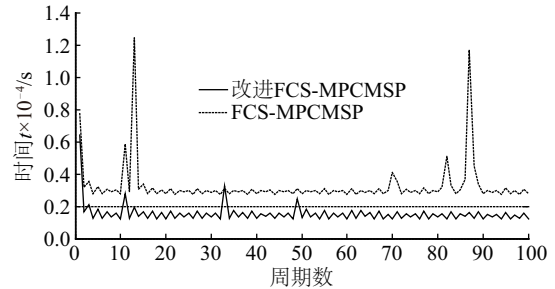


图7 运算时间对比

Fig. 7 Arithmetic time comparison

通过仿真和对比可知,图 2 所示正负序分离方法可以较准确提取出电网电压正负序分量;改进 FCS-MPCMS 算法可以降低算法的保守性,并网电流稳定,达到并网要求,并减少计算量,降低算法运行时间。

4 实验结果

为验证本文所提出算法的有效性和可行性,构建了主要由 PC 机和 TI 公司 32 位定点 TMS320F2812 DSP 组成的并网逆变器试验平台。试验平台的实验主电路如图 1 所示,实验系统参数与仿真模型参数一致。采用 HBC20LSP 电流霍尔传感器检测并网电流,其中电压与电流的关系为 $u=2.5\pm 2.0(i/I_{PN})$,额定电流 $I_{PN}=20$ A。

系统实验波形如图 8、图 9 所示,图 8 为三相电网电压波形,当 $t=0.02\text{ s}$ 时,a 相电网电压幅值下降了 20%。

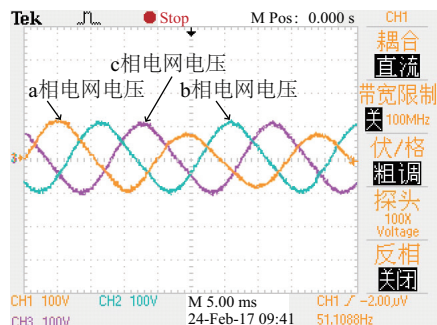


图 8 三相电网电压

Fig. 8 Three-phase grid voltage

图 9 为 a 相的并网电流与电网电压图,可看出电网电压和并网电流同频同相,功率因数为 1。由实验图可知,系统的实验波形和仿真波形基本一致,表明了本文改进 FCS-MPCMS 算法的有效性。

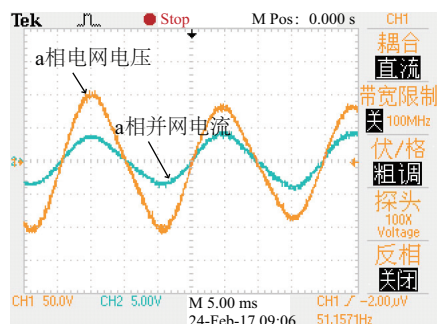


图 9 A 相电流和电压

Fig. 9 A phase current and voltage

5 结 论

针对不平衡电网下三相并网逆变器无法输出三相平衡电流的问题,使用基于复矢量滤波器的电网电压正负序分量计算方法,得到电网正序电压,根据瞬时功率法得到参考电流。并且对 FCS-MPCMS 算法进行改进:奇数周期采用传统算法,偶数周期同时选取最优和次优电压矢量对应的开关状态,再进一步求取 2 个开关状态中的最优开关,将 8 次预测函数计算变成一次电压计算,减少计算量。针对传统 FCS-MPC 算法忽略模型误差的问题,采用反馈校正的思想对其进行补偿。本文算法不仅可在一定程度上降低算法的保守性,而且相比于 FCS-MPCMS 算法,减少了计算量和运行时

间。仿真和实验结果验证了电网电压正负序分量计算方法和改进型 FCS-MPCMS 算法的有效性。

[参考文献]

- [1] Timbus A, Liserre M, Teodorescu R, et al. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 654—664.
- [2] 蒋卫宏. 不对称电网故障下 PWM 整流器的控制策略研究 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15): 3527—3530, 3576.
- [2] Jiang Weihong. Study on control scheme for PWM rectifier under generalized unbalanced grid conditions [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(15): 3527—3530, 3576.
- [3] Zhou Peng, He Yikang, Sun Dan. Improved direct power control of a DFIG based wind turbine during network unbalance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2465—2474.
- [4] 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.
- [4] 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.
- [5] 年 珩, 於妮飒, 曾 嵘. 不平衡电压下并网逆变器的预测电流控制技术 [J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1223—1229.
- [5] Nian Heng, Yu Nisa, Zeng Rong. Predictive current control for grid-connected inverters under unbalanced grid voltage [J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1223—1229.
- [6] Rodriguez P, Luna A, Candela I, et al. Multiresonant frequency locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 127—138.
- [7] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66—73.
- [7] Zhang Yongchang, Yang Haitao, Wei Xianglong. Model predictive control of permanent magnet synchronous motors based on fast vector selection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 66—73.
- [8] 李葛亮, 谢 桦, 赵 新, 等. 基于降阶谐振调节器的正负序分量检测方法 [J]. 电力系统保护与控制,

- 2013, 41(14): 41—47.
- [8] Li Geliang, Xie Hua, Zhao Xin, et al. Positive and negative sequence component detecting method based on reduced order resonant regulator[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 41—47.
- [9] 霍现旭, 胡书举, 许洪华. 电网不平衡下基于自适应观测器的锁相环研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 120—125.
- [9] Huo Xianxu, Hu Shuju, Xu Honghua. Phase-locked loop algorithm based on adaptive observer under unbalanced grid voltage condition[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 120—125.
- [10] 杨 勇, 赵方平, 阮 毅, 等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 153—159.
- [10] Yang Yong, Zhao Fangping, Ruan Yi, et al. Model current predictive control for three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 153—159.
- [11] 沈 坤, 章 兢, 王 坚, 等. 三相逆变器并联系统的无互连线预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 46—53.
- [11] Shen Kun, Zhang Jing, Wang Jian, et al. Wireless control of parallel three-phase inverter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 46—53.
- [12] 沈 坤, 章 兢, 王 坚. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 37—44, 173.
- [12] Shen Kun, Zhang Jing, Wang Jian. A model predictive control scheme of multi-setp prediction finite control set for converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 37—44, 173.
- [13] 沈 坤, 章 兢. 具有建模误差补偿的三相逆变器模型预测控制算法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 86—91.
- [13] Shen Kun, Zhang Jing. Model predictive control scheme with modeling error compensation for three-phase inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 86—91.
- [14] Xia Changliang, Liu Tao, Shi Tingna, et al. A simplified finite control set model predictive control for power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 28(99): 1—12.

CONTROL RESEARCH OF GRID-CONNECTED INVERTERS UNDER UNBALANCED GRID VOLTAGE

Li Donghui, Tian Lanye, Yao Lele, Dong Na

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Current quality is the important performance index for the grid-connected inverter under unbalanced grid voltage. Based on the mathematics models of grid-connected inverter under unbalanced grid voltage, the reference current of three-phase balance current was derived. Then a detection method for positive and negative grid voltage based on complex-vector filter was used. Besides that, an improved FCS-MPCMS algorithm was proposed. Odd cycles using traditional algorithm and the errors of model were compensated by the feedback correction. In even cycles, switching states of optimal and suboptimal voltage vector were selected. Then the optimal switching state was obtained among the two states so that the computational complexity of the algorithm can be reduced. Simulation and experimental results verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: model predictive control; unbalanced grid voltage; inverters; finite control set