Feb. 2023

DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2023. 02. 019

并网逆变器三矢量模型预测直接功率控制

何潜1, 何攻1, 陈力1, 帅红1, 孙越2

1. 国网重庆市电力公司, 重庆 400015; 2. 重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044

摘要:分布式电源可独立运行,也可并网运行,但为了实现分布式电源的高效利用,一般要并网,通过变换器方式是分布式电源接入电网的主要方式之一.本文探讨了并网逆变器的控制技术策略.并网逆变器采用双矢量模型预测直接功率控制在一定程度上改善了在采用单矢量模型预测直接功率控制时输出电压矢量固定、网侧电流畸变率高、无功功率脉动大等问题,但双矢量模型预测直接功率控制在两个矢量均为有效矢量时输出矢量的幅值不可调,且仅对无功功率实现了无差拍控制,有功功率脉动仍较大.针对这些不足,在其基础上提出了一种并网逆变器的三矢量模型预测直接功率控制策略,该控制策略将两个有效电压矢量与一个零电压矢量作用在一个控制周期内,使输出矢量方向与幅值均可调,且采用有功、无功功率无差拍控制的方式来计算矢量作用时间,进一步提高了控制精度.仿真和实验结果表明,相比单矢量、双矢量模型预测直接功率控制,并网逆变器采用三矢量模型预测直接功率控制的电流谐波含量更低,功率脉动较小,鲁棒性更强.

关 键 词:直接功率控制;并网逆变器;三矢量;无差拍控制;

模型预测控制

中图分类号: TM92 文献标志码: A 文 章 编 号: 1673 - 9868(2023)02 - 0192 - 11 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Three-vector Model Predictive Direct Power Control of Grid-connected Inverter

HE Qian¹, HE Gong¹, CHEN Li¹, SHUAI Hong¹, SUN Yue²

- 1. State Grid Chongging Electric Power Company, Chongging 400015, China;
- 2. School of Electrical Engineering, Chongging University, Chongging 400044, China

Abstract: Distributed generation can operate independently or in grid connected. However, in order to realize the efficient utilization of distributed generation, it is generally connected to the grid. Converter is one of the main ways for distributed generation to connect to power grid. This paper discusses the control strategy of grid connected inverter. The dual-vector model predictive direct power control for grid-connect-

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52077017); 国网重庆市电力公司重点科技项目(2021 渝电科技 10 #).

作者简介:何潜,硕士,高级工程师,主要从事电力系统新能源、分布式电源等并网保护与控制研究.

ed inverter improves the fixed output voltage vector, high grid-side current distortion rate, large reactive power pulsation and other problems of single-vector model predictive direct power control. However, the two-vector model predicts that the amplitude of the output vector cannot be adjusted when the two vectors are both effective, and the active power pulsation is still large when only the reactive power is controlled by the deadbeat control. Aiming at these deficiencies, a three-vector model of grid inverter is proposed to predict the direct power control strategy. The control strategy is two effective voltage vectors and a zero voltage vector in a control cycle to make the output vector direction and amplitude adjustable. The method of active and reactive power no beat control is applied to calculate the vector action time, which further improves the control precision. The simulation and experimental results show that compared with the direct power control predicted by the single vector model and the double-vector model, the direct power control predicted by the three-vector model for the grid-connected inverter has lower current harmonic content, smaller power pulsation and stronger robustness.

Key words: direct power control; grid-connected inverter; three vectors; no beat control; model predictive control

分布式能源以分散型、小规模的方式在用户旁就近布置,能够独立输送能源,与大电网等集中型能源供应方式相比,其能源利用率高,对环境友好,故越来越受到人们关注[1-4]。而困扰分布式能源发展的重要因素为并网问题,为将其更高效地应用,并网逆变器作为将能源输入电网的核心装备受到学者们重视,并网逆变器控制性能直接关系并网电能质量,多年来对其控制策略的改进一直是研究热点。模型预测直接功率控制(Model Predictive Direct Power Control,MPDPC)逻辑简单,动态响应快,价值函数设计灵活,能够较好地处理系统非线性约束。MPDPC与传统直接功率控制相比,不仅无需繁琐的PI参数设计,而且通过功率预测模型选择最优开关矢量,解决了传统直接功率控制由启发式开关表选取矢量的不精确性问题[5-6]。

目前单矢量模型预测控制应用较为广泛,虽然该控制策略有诸多优点,但其输出电压矢量直接在7种基本电压矢量中选取,方向与幅值均不可调,且在单个控制周期内仅作用一个电压矢量,控制精度有待提高^[7-8].对于以上问题,可以采用在单个控制周期内增加作用的电压矢量数目来解决.双矢量模型预测控制是在单矢量预测控制的基础上增加了一个电压矢量^[9-11],占空比模型预测控制是双矢量模型预测控制的一种,该控制策略将一个有效电压矢量与零电压矢量进行组合作用在当前控制周期,其中第二个电压矢量固定为零电压矢量,故在每个控制周期中只可选择6个固定方向的电压矢量^[12-14].文献[15-16]提出的双矢量模型预测控制没有特别规定某一电压矢量为零电压矢量,并在分配两个电压矢量的作用时间时遵循无差拍控制的方式,其输出电压矢量的覆盖范围在一定程度上得到了扩大,但当两个电压矢量均为有效电压矢量时,其输出电压矢量的覆盖范围在一定程度上得到了扩大,但当两个电压矢量均为有效电压矢量时,其输出电压矢量的幅值不可调,使输出电压矢量覆盖范围仍受限.针对双矢量模型预测控制的局限性,本文在其基础上又增加了一个电压矢量作用在每个控制周期,提出一种基于并网逆变器的三矢量模型预测直接功率控制,先通过价值函数从6个有效矢量中优选出第一个电压矢量,然后将其余5个有效矢量连同零矢量合成出5个期望电压矢量,使输出电压矢量的方向与幅值均可调,且通过功率无差拍原则分配电压矢量作用时间,同时完成了对有功功率与无功功率的无差拍控制,提高了控制精度.最后,由仿真与实验结果证实了所提三矢量 MPDPC 的可行性和有效性.

1 并网逆变器离散数学模型

电压源型 PWM 并网逆变器的拓扑结构如图 1 所示,其中, V_{dc} 、C 分别为直流侧的电压、电容, S_1 至 S_6 分别为并网逆变器内部的 6 个开关器件,L,R 分别为滤波电感、线路电阻, i_a , i_b 和 i_c 分别为逆变器网侧三相电流, e_a , e_b 和 e_c 分别为逆变器网侧三相电压,n 为网侧中性点, V_{aN} , V_{bN} 和 V_{cN} 分别为逆变器三相的输出电压。由于逆变器处在任何一种工作状态下,其每项桥臂仅允许一个开关器件导通,因此上下开关器件的

状态应该互补,可设 S_i 为单极性二值逻辑 开关函数,上桥臂导通可表示为 $S_i = 1$,下 桥臂导通可表示为 $S_i = 0$, i 为 a, b, c.

并网逆变器在两相静止 $(\alpha\beta)$ 下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} e_{\alpha} = u_{\alpha} - Ri_{\alpha} - L \frac{di_{\alpha}}{dt} \\ e_{\beta} = u_{\beta} - Ri_{\beta} - L \frac{di_{\beta}}{dt} \end{cases}$$
 (1)

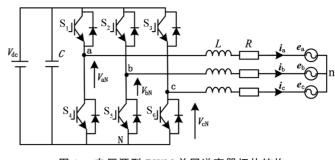


图 1 电压源型 PWM 并网逆变器拓扑结构

式(1)中 e_a , e_β , i_a , i_β 分别为电网电压与网侧电流在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量; u_α , u_β 为逆变器输出电压在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量,可表示为

$$\begin{cases} u_{a} = \frac{2}{3} V_{dc} \left[S_{a} - \frac{1}{2} (S_{b} + S_{c}) \right] \\ u_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} (S_{b} - S_{c}) \end{cases}$$
 (2)

由式(1) 可得:

$$\begin{cases}
\frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L}(u_{\alpha} - e_{\alpha} - Ri_{\alpha}) \\
\frac{\mathrm{d}i_{\beta}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L}(u_{\beta} - e_{\beta} - Ri_{\beta})
\end{cases}$$
(3)

由瞬时功率理论,可将有功功率 p 与无功功率 q 表示为

$$\begin{cases}
p = e_a i_a + e_\beta i_\beta \\
q = e_\beta i_a - e_a i_\beta
\end{cases}$$
(4)

对式(4) 两边同时求导可得:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = i_{\alpha} \frac{\mathrm{d}e_{\alpha}}{\mathrm{d}t} + e_{\alpha} \frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t} + i_{\beta} \frac{\mathrm{d}e_{\beta}}{\mathrm{d}t} + e_{\beta} \frac{\mathrm{d}i_{\beta}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = i_{\alpha} \frac{\mathrm{d}e_{\beta}}{\mathrm{d}t} + e_{\beta} \frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t} - i_{\beta} \frac{\mathrm{d}e_{\alpha}}{\mathrm{d}t} - e_{\alpha} \frac{\mathrm{d}i_{\beta}}{\mathrm{d}t} \end{cases}$$

$$(5)$$

将式(3)代入式(5)有:

$$\begin{cases}
\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L} (e_{\alpha}u_{\alpha} + e_{\beta}u_{\beta} - e_{\alpha}^{2} - e_{\beta}^{2} - Rp) + \omega p \\
\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L} (e_{\beta}u_{\alpha} + Re_{\alpha}i_{\beta} - e_{\alpha}u_{\beta} - Re_{\beta}i_{\alpha}) + \omega q
\end{cases}$$
(6)

根据欧拉法,由式(6)可得并网逆变器在两相静止坐标系下的离散功率预测模型:

$$\begin{cases} p(k+1) = p(k) + Ts\omega p + \frac{Ts}{L}(e_{\alpha}u_{\alpha} + e_{\beta}u_{\beta} - e_{\alpha}^{2} - e_{\beta}^{2} - Rp) \\ q(k+1) = q(k) + Ts\omega q + \frac{Ts}{L}(e_{\beta}u_{\alpha} + Re_{\alpha}i_{\beta} - e_{\alpha}u_{\beta} - Re_{\beta}i_{\alpha}) \end{cases}$$
(7)

式(7) 中 k 表示时间离散化后的当前时刻, k+1 表示下一时刻.

2 模型预测直接功率控制

2.1 单矢量模型预测直接功率控制

单矢量 MPDPC 输出的最优电压矢量 u_{opt} 直接从 7 种基本电压矢量中选取,其电压矢量选择如图 2 所示.

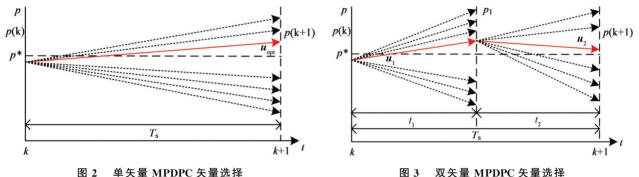
单矢量 MPDPC 的思路为根据瞬时功率理论,由在两相静止坐标系下的当前时刻电压和电流计算出当 前时刻功率,通过功率预测模型预测下一时刻功率.其中价值函数根据功率给定值与功率预测值间的误差 最小来设计, 使价值函数 g 最小的电压矢量即为最优电压矢量.

$$g = |p^* - p(k+1)| + |q^* - q(k+1)|$$
(8)

式(8) 中 p^*,q^* 为有功功率与无功功率的给定值.

2. 2 双矢量模型预测直接功率控制

双矢量 MPDPC 在单矢量 MPDPC 的基础上,增加了一个电压矢量作用在每个控制周期,其电压矢量 选择如图 3 所示,第一个电压矢量用 \mathbf{u}_1 表示,其作用的时间为 \mathbf{t}_1 ,第二个电压矢量用 \mathbf{u}_2 表示,其作用的时 间为 t₂.



双矢量 MPDPC 矢量选择

根据无差拍控制原则,可将下一时刻的无功功率表示为

$$q(k+1) = q(k) + s_{q1}t_1 + s_{q2}(T_s - t_1) = q^*$$
(9)

式(9)中 s_{q1} 为在第一个电压矢量作用下的无功功率斜率; s_{q2} 为在第二个电压矢量作用下的无功功率斜率. 由式(6) 可得:

$$s_{qz} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \Big|_{u=u_z} = \omega q + \frac{1}{L} (Re_{\alpha} i_{\beta} - Re_{\beta} i_{\alpha})$$
 (10)

$$s_{q1} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \bigg|_{u=u_1} = s_{qz} + \frac{1}{L} (e_{\beta}u_{\alpha 1} - e_{\alpha}u_{\beta 1}) \tag{11}$$

$$s_{q2} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \bigg|_{u=u_{\alpha}} = s_{qz} + \frac{1}{L} (e_{\beta}u_{\alpha 2} - e_{\alpha}u_{\beta 2})$$
 (12)

式(10) - (12) 中 u_z 为零电压矢量, s_{az} 为在零电压矢量作用下的无功功率斜率; u_{a1} , u_{b1} , u_{a2} , u_{b2} 分别为第 一个电压矢量与第二个电压矢量在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量.

由式(9) 可得第一个电压矢量与第二个电压矢量各自的作用时间分别为

$$t_1 = \frac{q^* - q(k) - s_{q2} T_s}{s_{q1} - s_{q2}}$$
 (13)

$$t_2 = Ts - t_1 \tag{14}$$

双矢量模型预测直接功率控制的输出电压矢量在由第一个电压矢量与第二个电压矢量合成的期望电 压矢量中选取,此时式(7)中的 u_{α} , u_{β} 可表示为

$$u_{\alpha} = \frac{t_1}{Ts} u_{\alpha 1} + \frac{t_2}{Ts} u_{\alpha 2} \tag{15}$$

$$u_{\beta} = \frac{t_1}{Ts} u_{\beta 1} + \frac{t_2}{Ts} u_{\beta 2} \tag{16}$$

双矢量模型预测直接功率控制先从7种基本电压矢量中通过价值函数选取第一个最优电压矢量,然后 将其余 6 种电压矢量作为与第一个最优电压矢量合成期望电压矢量的备选. 最后将使 g 最小的期望电压矢 量输出,其相应所选的备选矢量即为第二个电压矢量.

3 三矢量模型预测直接功率控制

3.1 基本原理

为使功率预测值进一步逼近功率给定值,并同时对有功功率与无功功率完成无差拍控制,提高系统性能,本文在双矢量模型预测直接功率控制的基础上在每个控制周期内再增加一个起作用的电压矢量,提出一种三矢量模型预测直接功率控制策略,该策略通过两个有效电压矢量与一个零电压矢量合成出期望电压矢量作用在每个控制周期,其电压矢量选择见图 4.

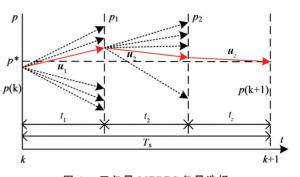


图 4 三矢量 MPDPC 矢量选择

该策略先在6种有效电压矢量中通过价值函数优选出第一个电压矢量,再将剩下5种有效电压矢量作为备选矢量与第一个电压矢量连同零电压矢量各自组合,合成出5种期望电压矢量,将使g最小的期望电压矢量输出,其输出电压矢量方向与幅值均可调.并网逆变器三矢量模型预测直接功率控制的系统控制框图见图5.

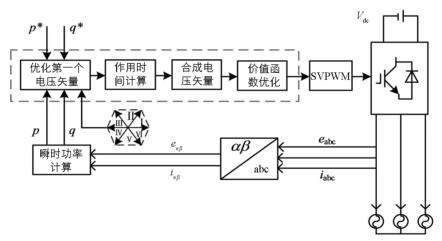


图 5 并网逆变器三矢量 MPDPC 系统控制框图

3.2 矢量作用时间

根据无差拍控制原则,可将下一时刻的有功功率、无功功率表示为

$$\begin{cases} p(k+1) = p(k) + s_{p1}t_1 + s_{p2}t_2 + s_{pz}t_z = p^* \\ q(k+1) = q(k) + s_{a1}t_1 + s_{a2}t_2 + s_{az}t_z = q^* \end{cases}$$
(17)

式(17) 中 s_{p1} , s_{p2} , s_{pz} 分别为在第一个电压矢量、第二个电压矢量、零电压矢量作用下有功功率的斜率, t_z 表示零电压矢量作用的时间.

$$s_{pz} = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \bigg|_{u=u_{z}} = \omega p - \frac{1}{L} (Rp + e_{\alpha}^{2} + e_{\beta}^{2})$$
 (18)

$$s_{p1} = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \bigg|_{u=u_1} = s_{pz} + \frac{1}{L} (e_\alpha u_{\alpha 1} + e_\beta u_{\beta 1})$$
 (19)

$$s_{p2} = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t} \bigg|_{u=u_2} = s_{pz} + \frac{1}{L} (e_a u_{a2} + e_\beta u_{\beta 2})$$
 (20)

联立式(10) - (12)、式(17) - (20) 可得到各矢量的作用时间

$$t_{i} = \frac{(p^{*} - p(k))(s_{q2} - s_{qz}) + (q^{*} - q(k))(s_{pz} - s_{p2})}{s_{qz}s_{p2} + s_{q1}s_{pz} + s_{q2}s_{p1} - s_{q1}s_{p2} - s_{q2}s_{pz} - s_{qz}s_{p1}} +$$

$$\frac{T_{s}(s_{qz}s_{p2} - s_{q2}s_{pz})}{s_{qz}s_{p2} + s_{q1}s_{pz} + s_{q2}s_{p1} - s_{q1}s_{p2} - s_{q2}s_{pz} - s_{qz}s_{p1}}
t_{z} = T_{s} - t_{1} - t_{2}$$

$$t_{j} = \frac{(p^{*} - p(k))(s_{qz} - s_{q1}) + (q^{*} - q(k))(s_{p1} - s_{pz})}{s_{qz}s_{p2} + s_{q1}s_{pz} + s_{q2}s_{p1} - s_{q1}s_{p2} - s_{q2}s_{pz} - s_{qz}s_{p1}} + \frac{T_{s}(s_{q1}s_{pz} - s_{qz}s_{p1})}{s_{qz}s_{p2} + s_{q1}s_{pz} + s_{q2}s_{p1} - s_{q1}s_{p2} - s_{q2}s_{pz} - s_{qz}s_{p1}}$$

在计算出 3 个电压矢量的作用时间后,还需要考虑其数值是否在 $0 \sim T_s$ 范围内,可分如下 4 种情况:

- 1) 若 t_1 , t_2 和 t_z 均在 0 $\sim T_s$ 范围内,则让两个有效矢量与一个零矢量作用于当前控制周期.
- 2) 若 t_1 和 t_2 均在 $0 \sim T_s$ 范围内,且 t_z 未在 $0 \sim T_s$ 范围内,则让两个有效矢量作用于当前控制周期.
- 3) 若 t_1 和 t_2 中仅一个在 $0 \sim T_s$ 范围内,且 t_z 在 $0 \sim T_s$ 范围内,则让一个有效矢量与一个零矢量作用于当前控制周期.
- 4) 若 t_1 和 t_2 中仅一个在 $0 \sim T_s$ 范围内,且 t_z 未在 $0 \sim T_s$ 范围内,则让一个有效矢量作用于当前控制周期.

3.3 电压矢量的合成

三矢量模型预测直接功率控制通过两个有效电压矢量与一个零电压矢量来合成期望电压矢量,三矢量模型预测直接功率控制的电压矢量选择如表 1 所示,期望电压矢量 $\boldsymbol{u}_{\text{exp}}$ 的合成如图 6 所示.

第一个有效矢量	第二个有效矢量	零矢量	期望矢量
\boldsymbol{u}_1	\boldsymbol{u}_2 , \boldsymbol{u}_3 , \boldsymbol{u}_4 , \boldsymbol{u}_5 , \boldsymbol{u}_6	u_0 或 u_7	$\boldsymbol{u}_{\mathrm{exp1,1}\sim5}$
\boldsymbol{u}_2	\boldsymbol{u}_1 , \boldsymbol{u}_3 , \boldsymbol{u}_4 , \boldsymbol{u}_5 , \boldsymbol{u}_6	u_0 或 u_7	$oldsymbol{u}_{ m exp2,1}{\scriptstyle\sim}_5$
\boldsymbol{u}_3	\boldsymbol{u}_1 , \boldsymbol{u}_2 , \boldsymbol{u}_4 , \boldsymbol{u}_5 , \boldsymbol{u}_6	\boldsymbol{u}_0 或 \boldsymbol{u}_7	$oldsymbol{u}_{ m exp3,1\sim5}$
u_4	\boldsymbol{u}_1 , \boldsymbol{u}_2 , \boldsymbol{u}_3 , \boldsymbol{u}_5 , \boldsymbol{u}_6	$\boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle 0}$ 或 $\boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle 7}$	$oldsymbol{u}_{ m exp4,1}{\sim}5$
\boldsymbol{u}_{5}	\boldsymbol{u}_1 , \boldsymbol{u}_2 , \boldsymbol{u}_3 , \boldsymbol{u}_4 , \boldsymbol{u}_6	$\boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle 0}$ 或 $\boldsymbol{u}_{\scriptscriptstyle 7}$	$oldsymbol{u}_{\exp 5,1\sim 5}$
\boldsymbol{u}_6	\boldsymbol{u}_1 , \boldsymbol{u}_2 , \boldsymbol{u}_3 , \boldsymbol{u}_4 , \boldsymbol{u}_5	$\boldsymbol{u}_0 \stackrel{\mathbf{I}}{\otimes} \boldsymbol{u}_7$	$oldsymbol{u}_{ m exp6,1}{\sim}5$

表 1 三矢量模型预测直接功率控制矢量选择

基于三矢量的模型预测直接功率控制策略实现如下:

- 1)根据单矢量模型预测直接功率控制策略选取第一个电压矢量.
- 2) 根据式(10)-(12)、式(17)-(20)计算功率斜率,并由式(21)得到3个矢量的作用时间,并分情况考虑其范围.
- 3) 由式(15)、式(16)得到 6 种期望电压矢量 在两相静止坐标系下相应的分量,并将其代入式 (7)得到对应的有功、无功功率预测值.
- 4) 将预测的功率值代入式(8),选择令 g 最小的期望电压矢量输出至空间矢量脉宽调制模块.

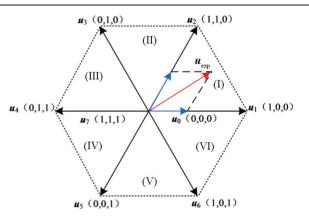


图 6 三矢量期望电压矢量合成

4 3 种控制策略的比较

根据上述 3 种模型预测直接功率控制策略的原理,表 2 对比了其矢量数目、寻优计算和电压矢量 作用时间计算方法,由该表可知,相比双矢量法在单个控制周期内需要 13 次寻优且仅对无功功率完 成无差拍控制,三矢量法则减少了寻优次数,降低了计算量,并通过有功功率和无功功率无差拍控制的方式来计算电压矢量的作用时间,同时实现了对有功功率与无功功率的无差拍控制,可以取得更好的控制效果.

表	2	3	种	控	制	策	略	的	比	较	

	单矢量	双矢量	三矢量
矢量数目	1	2	3
寻优次数	7	13	11
电压矢量作用时间计算方法	_	无功功率无差拍	有功、无功功率无差拍

5 仿真与实验结果分析

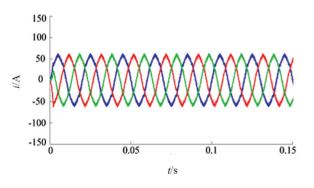
对单矢量、双矢量、三矢量模型预测直接功率控制这 3 种控制策略在 Matlab/Simulink 中搭建了相应的仿真模型进行比较分析. 并网逆变器参数见表 3.

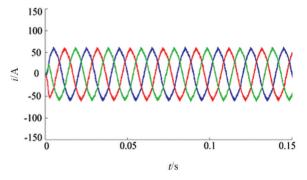
表 3 并网逆变器参数

参数	数值	参数	数值
直流侧电压/V	700	开关频率/kHz	10
直流侧电容/μF	2 200	电网频率/Hz	50
线路等效电阻/Ω	0.01	电网相电压有效值/V	220
滤波电感值/mH	1.5		

5.1 仿真结果分析

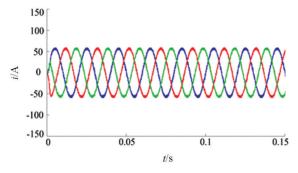
并网逆变器在3种模型预测直接功率控制下的稳态网侧三相电流波形如图7所示.相比单、双矢量模型预测直接功率控制,在本文所提三矢量法控制下,网侧三相电流波形更平滑、正弦度更好.





(a) 单矢量法稳态网侧三相电流波形

(b) 双矢量法稳态网侧三相电流波形



(c) 三矢量法稳态网侧三相电流波形

图 7 3 种控制方法的稳态网侧三相电流波形

在 0.2 s 时将 p^* 从 25 kW 突变到 50 kW. 由图 8 可见,在 3 种控制方法下的 p 都能快速响应 p^* 的改变,动态性能较好,其中双矢量法由于对无功功率实现了无差拍控制,故无功功率脉动相比单矢量法有所改善,但有功功率脉动仍较大. 相比单矢量和双矢量法,三矢量法同时对有功、无功功率实现了无差拍控制,较好地改善了功率脉动,提高了控制精度.

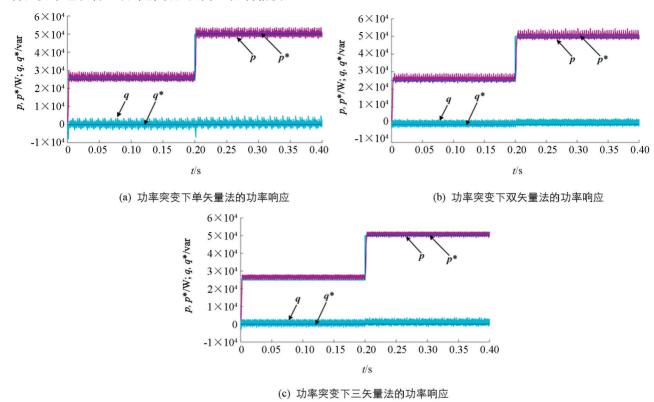


图 8 功率突变下 3 种控制方法的功率响应

图 9 为 3 种控制方法的网侧 A 相电流动态波形,其均可快速响应 p^* 的突变,具有较好的动态性能. 在逆变器采用单、双矢量法控制时,电流均存在较明显畸变,在逆变器采用三矢量法控制时,电流波形平滑,正弦度较高,波形质量得到较好改善.

图 10 为 3 种控制方法的 A 相电流谐波畸变率, 其均小于 5%, 满足逆变器电流并网的国家标准. 相比单、双矢量模型预测直接功率控制, 三矢量法的电流谐波畸变率更低, 进一步改善了并网电能质量.

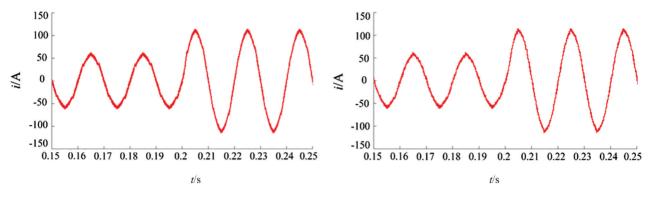
5.2 实验结果分析

为进一步验证三矢量模型预测直接功率控制相比单、双矢量模型预测直接功率控制更有效,本文基于 RT-LAB半实物仿真系统搭建了并网逆变器实验平台,实验与仿真的并网逆变器参数一致.

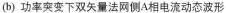
由图 11 可见,相比单、双矢量模型预测直接功率控制,三矢量法在有功功率给定值发生突变前后,网侧三相电流正弦度更高,具有较好的波形质量.

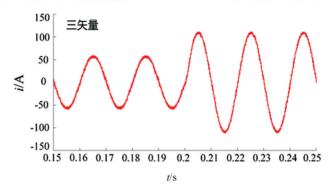
由图 12 可见,三矢量模型预测直接功率控制的电网电压与网侧 A 相电流几乎同相位,功率因数较高,且在有功功率给定值突变后能迅速响应,相比单、双矢量模型预测直接功率控制波形更平滑、控制效果更好.

综上所述,相比于单、双矢量模型预测直接功率控制,本文所提三矢量模型预测直接功率控制具有更好的控制性能,实验结果验证了仿真与理论的有效性.



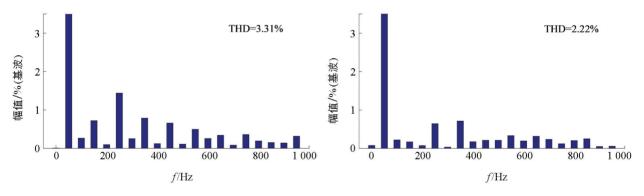
(a) 功率突变下单矢量法网侧A相电流动态波形





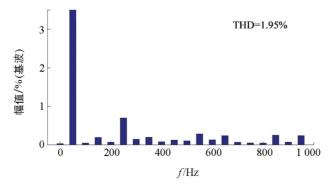
(c) 功率突变下三矢量法网侧A相电流动态波形

图 9 功率突变下 3 种控制方法的 A 相并网电流动态波形



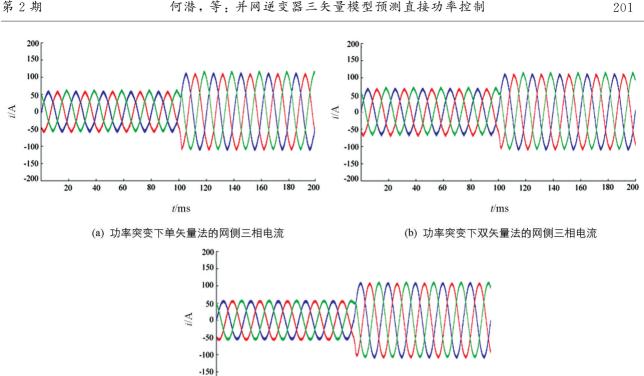
(a) 单矢量法的网侧A相电流谐波畸变率

(b) 双矢量法的网侧A相电流谐波畸变率



(c) 三矢量法的网侧A相电流谐波畸变率

图 10 3 种控制方法的网侧 A 相电流谐波畸变率

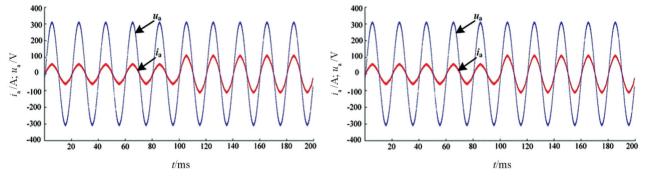


t/ms (c) 功率突变下三矢量法的网侧三相电流

100 120 140

160

功率突变下3种方法的三相并网电流 图 11



(a) 功率突变下单矢量法的电网电压与网侧A相电流

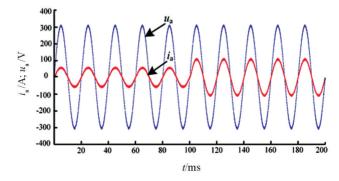
-200

20

40 60

(b) 功率突变下双矢量法的电网电压与网侧A相电流

200 180



(c) 功率突变下三矢量法的电网电压与网侧A相电流

图 12 功率突变下 3 种方法的电网电压与网侧 A 相电流

6 结论

本文将并网逆变器作为研究对象,在传统单矢量模型预测直接功率控制的基础上引入双矢量模型预测直接功率控制,并针对双矢量法的局限性提出了一种三矢量模型预测直接功率控制策略.本文所提三矢量模型预测直接功率控制先在6个有效矢量中优选第一个矢量,再将其与余下5个有效矢量连同零矢量合成期望电压矢量,使输出电压矢量的幅值与方向均可调,并同时对有功、无功功率实现了无差拍控制,提高了功率控制精度.仿真与实验结果表明:相比于前两种控制方法,本文所提三矢量模型预测直接功率控制能较好地提高逆变器网侧电流波形质量,降低电流谐波畸变率,改善功率脉动,具有良好的动态和稳态性能.

参考文献:

- [1] ALANNE K, SSSRI A. Distributed Energy Generation and Sustainable Development [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(6): 539-558.
- [2] MARIBUA K M, FIRESTONE R M, MARNAY C, et al. Distributed Energy Resources Market Diffusion Model [J]. Energy Policy, 2007, 35(9): 4471-4484.
- [3] FERREIRA H L, COSTESCU A, L'ABBATE A, et al. Distributed Generation and Distribution Market Diversity in Europe [J]. Energy Policy, 2011, 39(9): 5561-5571.
- [4] 古济铭,赵科,王新阳,等.基于模型参数修正和有源阻尼的逆变系统并网控制策略[J].西南大学学报(自然科学版),2021,43(4):157-166.
- [5] 张辉, 李志新, 王涛, 等. 基于三矢量的三相 PWM 整流器低复杂性模型预测直接功率控制 [J]. 电网技术, 2018, 42(3): 957-965.
- [6] 年珩,李龙奇,程鹏.谐波电压下并网逆变器的无锁相环直接功率控制[J].中国电机工程学报,2017,37(11):3243-3253,3380.
- 「7] 张志文,李松,谢小城,等. 三相电压型 PWM 整流器预测功率控制研究 [J]. 电源学报,2017,15(5):123-130.
- [8] 张帆,刘跃敏,范波,等. 基于模型预测的三相 PWM 整流器直接功率控制 [J]. 电机与控制应用,2016,43(7): 27-31.
- [9] ZHANG Y C, YANG H T. Generalized Two-Vector-Based Model-Predictive Torque Control of Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3818-3829.
- [10] 张虎,张永昌,杨达维.基于双矢量模型预测直接功率控制的双馈电机并网及发电[J].电工技术学报,2016,31(5):69-76.
- [11] ZHANG Y C, YANG H T. Two-Vector-Based Model Predictive Torque Control Without Weighting Factors for Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1381-1390.
- [12] ZHANG Y C, YANG H T. Model Predictive Torque Control of Induction Motor Drives with Optimal Duty Cycle Control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6593-6603.
- [13] 徐艳平,张保程,周钦,等. 基于 SVM 的最优占空比模型预测电流控制 [J]. 电气传动, 2017, 47(7): 12-16.
- [14] SONG Z F, TIAN Y J, CHEN W, et al. Predictive Duty Cycle Control of Three-Phase Active-Front-End Rectifiers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 698-710.
- [15] 徐艳平,王极兵,王建渊,等。考虑预测误差的改进双矢量模型预测电流控制[J]。电气传动,2018,48(9):62-66。
- [16] 郭磊磊,晋玉祥,罗魁. 改进的低损耗并网逆变器双矢量模型预测电流控制方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(10): 136-142.