

# 三相 PWM 整流器模型预测的直接功率控制研究

## Model Predictive Direct Power Control Research on Three-phase PWM Rectifier

王吉校<sup>1</sup>, 张瑞伟<sup>2</sup>

Wang Jixiao<sup>1</sup>, Zhang Ruiwei<sup>2</sup>

1. 72749 部队, (郑州, 450016); 2. 重庆通信学院 电力工程系, (重庆, 400035);

1. Troop 72749, (Zhengzhou, 450016); 2. Electrical Engineering Department, Chongqing Communication Institute (Chongqing, 400035)

**摘要:** 三相 PWM 整流器在新能源发电并网、电机变频控制等领域得到了广泛的应用。本文研究了三相 PWM 整流器基于模型预测的直接功率控制算法 (MPC-DPC)。MPC-DPC 在每个采样周期内, 通过电网电压矢量选择有效作用矢量, 为实现定频控制和减小开关损耗, 结合零矢量采用 3+3 的矢量序列, 并以减小有功功率和无功功率偏差为目标, 计算出每个矢量的最优作用时间。对 MPC-DPC 算法进行了仿真研究, 结果表明, MPC-DPC 具有良好的动静态性能。

**关键词:** PWM 整流器 模型预测控制 直接功率控制 有功功率 无功功率

**Abstract:** Three-phase PWM rectifier is widely used in the fields of new energy paralleling operation and motor control technology. This paper mainly studies the direct power control algorithm of three-phase PWM rectifier based on model predictive control (MPC-DPC). During every sampling period, effective interaction vector is selected through the voltage vector and vector sequence of 3+3 is used to realize constant frequency control and to reduce switching loss combined with zero vector, and thus MPC-DPC figures out the best acting time of every vector, aiming to reduce the deviation of active power and reactive power. The result shows MPC-DPC has excellent dynamic and static performance with the simulation study of MPC-DPC.

**Key words:** PWM rectifier, Model predictive control, Direct power control, Active power, Reactive power

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2015) 07-0025-04

## 0 引言

电压型 PWM 整流器能够实现电网侧电流正弦化, 具有能量可双向流动、单位功率因数运行的特点, 因此, 已广泛应用于有源电力滤波器、超导储能、电机调速、高压直流输电及新能源并网发电等系统中<sup>[1-3]</sup>。

传统的 DPC 控制具有开关频率变化的缺点, 为输入电网滤波电感的优化设计提出了极大挑战<sup>[4]</sup>。为了实现开关频率恒定和较小的开关损耗, 本文研究了 MPC-DPC 算法在三相 PWM 整流器中的应用。在建立三相 PWM 整流器数学模型的基础上, 对 MPC-DPC 的有效矢量选择、最优作用时间的确定原则进行了研究。并对 MPC-DPC 算法进行了仿真, 结果表明

MPC-DPC 算法具有优良的动静态性能。

## 1 三相 PWM 整流器的数学模型

电压型 PWM 整流器的电路拓扑结构如图 1 所示。在  $\alpha$   $\beta$  坐标系下, PWM 整流器的瞬时有功功率  $P_g$  和瞬时无功功率  $Q_g$  可表示为<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} P_g &= \frac{3}{2}(u_{g\alpha}i_{g\alpha} + u_{g\beta}i_{g\beta}) \\ Q_g &= \frac{3}{2}(u_{g\beta}i_{g\alpha} - u_{g\alpha}i_{g\beta}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u_{g\alpha}$ 、 $u_{g\beta}$ 、 $i_{g\alpha}$ 、 $i_{g\beta}$  分别表示电网电压和电流在  $\alpha$

轴和  $\beta$  轴的分量。

对 (1) 式进行微分, 可以得到  $P_g$  和  $Q_g$  的瞬时变化率为:

$$\begin{aligned} \frac{dP_g}{dt} &= \frac{3}{2} \left( u_{g\alpha} \frac{di_{g\beta}}{dt} + i_{g\alpha} \frac{du_{g\alpha}}{dt} + u_{g\beta} \frac{di_{g\beta}}{dt} + i_{g\beta} \frac{du_{g\beta}}{dt} \right) \\ \frac{dQ_g}{dt} &= \frac{3}{2} \left( u_{g\beta} \frac{di_{g\alpha}}{dt} + i_{g\alpha} \frac{du_{g\beta}}{dt} - u_{g\alpha} \frac{di_{g\beta}}{dt} - i_{g\beta} \frac{du_{g\alpha}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

在电网电压平衡的三相系统中, 电网电压的微分可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{du_{g\alpha}}{dt} &= -\omega u_{g\beta} \\ \frac{du_{g\beta}}{dt} &= \omega u_{g\alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  代表电网角频率。

电网电流的瞬时变化率可以表示为:

$$\begin{aligned} \frac{di_{g\alpha}}{dt} &= \frac{u_{g\alpha} - Ri_{g\alpha} - v_{g\alpha}}{L} \\ \frac{di_{g\beta}}{dt} &= \frac{u_{g\beta} - Ri_{g\beta} - v_{g\beta}}{L} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $R$ 、 $L$  分别表示输入滤波器的等效电阻和电感,  $v_{g\alpha}$ 、 $v_{g\beta}$  代表变换器输出电压在  $\alpha$  轴和  $\beta$  轴的分量。

把式 (1)、式 (3)、式 (4) 代入 (2) 式, 通过简单整理可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{dP_g}{dt} &= \frac{3}{2L} [(u_{g\alpha}^2 + u_{g\beta}^2) - (u_{g\alpha}v_{g\alpha} + u_{g\beta}v_{g\beta})] + \frac{R}{L} P_g + \omega Q_g \\ \frac{dQ_g}{dt} &= \frac{3}{2L} (u_{g\alpha}v_{g\beta} - u_{g\beta}v_{g\alpha}) + \frac{R}{L} Q_g - \omega P_g \end{aligned} \quad (5)$$

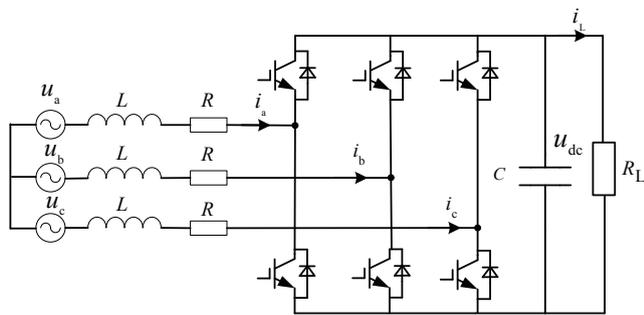


图 1 三相 PWM 整流器电路拓扑

## 2 控制算法的实现

对于二电平 PWM 整流器, 其变换器总共可以产生 8 个电压矢量, 即  $V_0$ - $V_7$ , 其中  $V_0$ 、 $V_7$  为零矢量,  $V_1$ - $V_6$  为有效矢量。每个电压矢量作用到变换器所引起的  $P_g$  和  $Q_g$  的瞬时变化率, 可以用  $f_{pi}$ 、 $f_{qi}$  表示为:

$$\begin{aligned} f_{pi} &= \left. \frac{dP_g}{dt} \right|_{v_g = v_i} \\ f_{qi} &= \left. \frac{dQ_g}{dt} \right|_{v_g = v_i} \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $i \in [0,7]$ 。

通常, 整个  $\alpha$   $\beta$  平面可以分成 12 个扇区, 如图 2 所示。根据电网电压的瞬时相位信息, 可以确定变换器输出电压矢量所在扇区。并利用相邻有效矢量来合成最终的输出电压矢量。

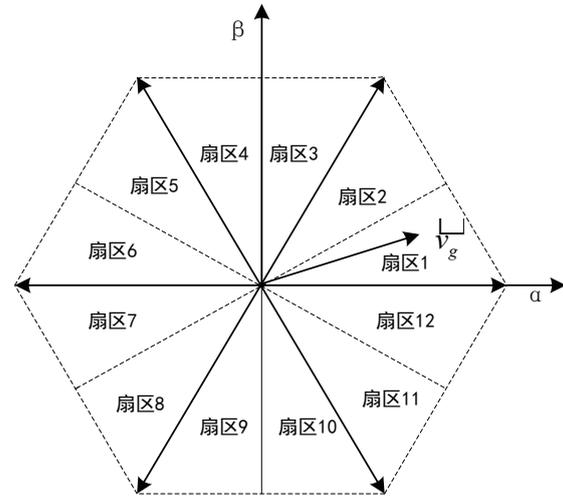


图 2  $\alpha$   $\beta$  平面内的 12 个扇区

表 1 3+3 电压矢量作用时序

扇区	电压矢量作用时序
1	$V_1 - V_2 - V_7 - V_7 - V_2 - V_1$
2	$V_0 - V_1 - V_2 - V_2 - V_1 - V_0$
3	$V_0 - V_3 - V_2 - V_2 - V_3 - V_0$
4	$V_3 - V_2 - V_7 - V_7 - V_2 - V_3$
5	$V_3 - V_4 - V_7 - V_7 - V_4 - V_3$
6	$V_0 - V_3 - V_4 - V_4 - V_3 - V_0$
7	$V_0 - V_5 - V_4 - V_4 - V_5 - V_0$
8	$V_5 - V_4 - V_7 - V_7 - V_4 - V_5$
9	$V_5 - V_6 - V_7 - V_7 - V_6 - V_5$
10	$V_0 - V_5 - V_6 - V_6 - V_5 - V_0$
11	$V_0 - V_1 - V_6 - V_6 - V_1 - V_0$
12	$V_1 - V_6 - V_7 - V_7 - V_6 - V_1$

为了实现定频控制和减小切换损耗, 采用 3+3 的电压矢

量序列形式<sup>[6]</sup>，其作用时序如表 1 所示。该算法中三个矢量的作用时间分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 。则在下一个时刻  $k+1$  时的有功功率  $P_{k+1}$  和无功功率  $Q_{k+1}$  为：

$$P_{k+1} = P_k + 2 \sum_{i=1}^3 f_{pi} t_i \quad (7)$$

$$Q_{k+1} = Q_k + 2 \sum_{i=1}^3 f_{qi} t_i$$

为了计算  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  建立如下的目标函数

$$J(t_1, t_2, t_3) = e_{p,k+1}^2 + e_{q,k+1}^2 \quad (8)$$

式 (8) 实际上是一个带有约束的最优化问题，通过求解可以得到最优的  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  为：

$$t_1 = \frac{(f_{q2} - f_{q3})e_{p,k} + (f_{p3} - f_{p2})e_{q,k} + (f_{p2}f_{q3} - f_{p3}f_{q2})T_s}{2((f_{q2} - f_{q3})f_{p1} + (f_{q3} - f_{q1})f_{p2} + (f_{q1} - f_{q2})f_{p3})}$$

$$t_2 = \frac{(f_{q3} - f_{q1})e_{p,k} + (f_{p1} - f_{p3})e_{q,k} + (f_{q1}f_{p3} - f_{q3}f_{p1})T_s}{2((f_{q2} - f_{q3})f_{p1} + (f_{q3} - f_{q1})f_{p2} + (f_{q1} - f_{q2})f_{p3})} \quad (9)$$

$$t_3 = \frac{T_s}{2} - t_1 - t_2$$

### 3 仿真验证

为了验证 PWM 整流器模型预测控制算法的正确性和有效性，在 Matlab/Simulink 环境下搭建了系统的仿真模型。整个系统的仿真参数如表 2 所示。

表 2 系统主要参数

参数	数值
额定功率 /kW	2
输入相电压有效值 V	170
电网频率 /Hz	50
滤波电感 /mH	6
等效电阻 /Ω	0.05
输出直流电压 /V	500
输出滤波电容 /μF	470
开关频率 /kHz	20

图 3 所示为稳态条件下的仿真波形。仿真条件为：有功功率参考为  $P^*=1000W$ ，无功功率参考为  $Q^*=0VA$ 。由仿真结果可以看出，电网电流实现了正弦化并且和电网电压相位一致，有功功率和无功功率输出稳态波动很小。

为了考察模型预测算法的动态性能，在 0.5s 时有功功率参考由 1000W 阶跃至 1500W，其他仿真条件与稳态相同，仿真结果如图 4 所示。可以看出有功功率输出能够快速跟踪给定，并且在整个过程中无功功率始终保持为 0，与有功功率实现了很好的解耦。

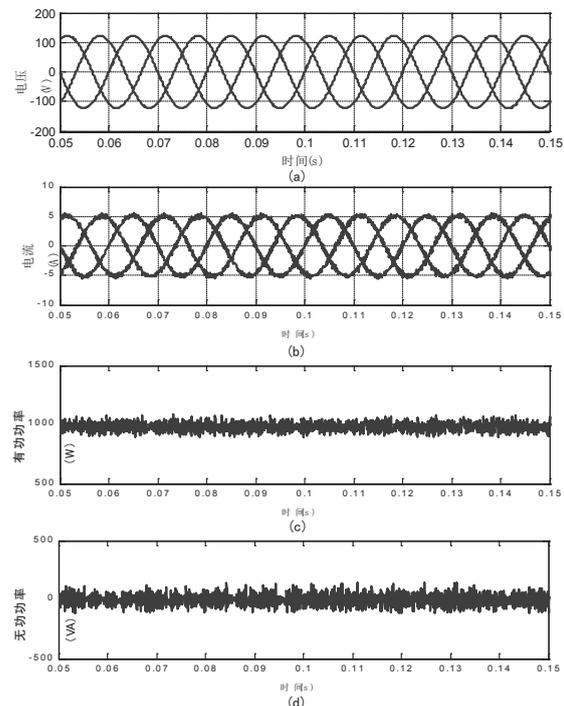


图 3 稳态条件下仿真结果

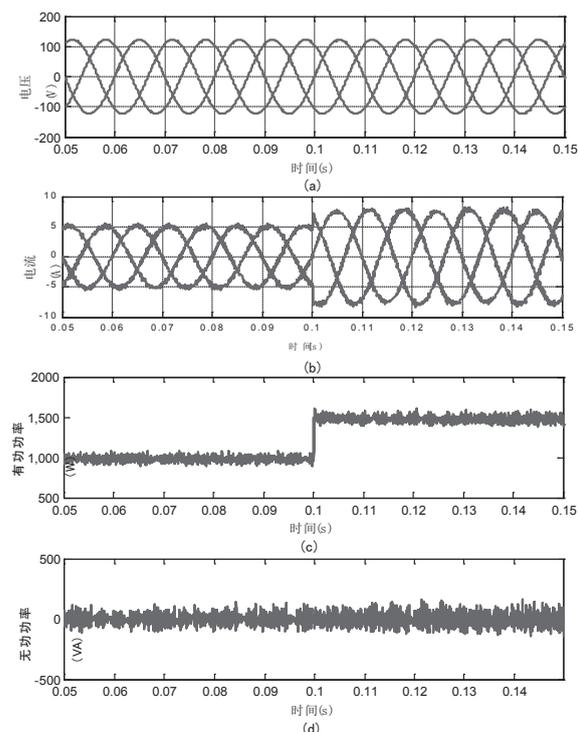


图 4 有功阶跃条件下的仿真结果

### 4 结语

本文对三相 PWM 整流器的 MPC-DPC 控制算法进行了系统研究，MPC-DPC 控制算法基于 PWM 整流器的数学模型，在每个采样周期内对下一周期的作用矢量，每个矢量的作用

(下转第 30 页)