

电压型 PWM 整流器功率控制策略研究^①

孙向群^{②1}, 王久和²

(1. 秦皇岛港务集团有限公司第八分公司, 河北 秦皇岛 066001; 2. 北京科技大学信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于功率控制策略的三相电压型 PWM 整流器控制系统的组成与原理, 通过建立基于 MATLAB/Simulink 环境下的仿真模型, 对系统进行了仿真研究, 结果表明 DPC 系统具有良好的动态性能, 并具有结构简单、无 PWM 调制模块、高功率因数、低谐波干扰等优点。

关键词: PWM 整流器; 直接功率控制; 瞬时功率; 仿真

中图分类号: TM422 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7169(2004)02-0080-04

随着电力电子技术和计算机技术的发展, 出现了以 PWM 控制技术为基础的各类交流装置。由于 PWM 整流器具有能量双向流动、恒定直流电压控制、低谐波输入电流、小容量滤波器及高功率因数(常接近于 1)的优点, 广泛应用于单位功率因数整流、有源滤波及无功补偿、交流传动、等变流控制中。电压型 PWM 整流器控制策略有直接和间接两种电流控制; 其控制系统结构为直流电压外环、交流电流内环的级联结构, 并需 PWM 调制模块和复杂的算法。对此, 从功率角度看, 在交流源电压一定的情况下, 如能直接控制 PWM 整流器的瞬时功率(有功和无功), 同样可达到控制瞬时输入电流的效果, 此种控制策略称为直接功率控制(DPC)。DPC 系统结构为直流电压外环、功率控制内环结构; 根据交流源电压及瞬时功率在开关表中选择整流器输入电压, 实现高性能整流。因此, 基于直接功率控制策略的 PWM 整

流器具有更高的功率因数、低的 THD、高效率、算法及系统结构简单等优点。对此, 本文先介绍三相电压型 PWM 整流器 DPC 系统的组成与原理, 再利用 Simulink 构成仿真模型, 研究电压型 PWM 整流器直接功率控制系统的性能。

1 三相电压型 PWM 整流器 DPC 系统的组成与原理

1.1 三相电压型 PWM 整流器的数学模型

三相电压型 PWM 整流器主电路如图 1 所示, 图中 u_a 、 u_b 、 u_c 为三相对称电源电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相线电流; S_a 、 S_b 、 S_c 为整流器开关管的开关信号, $S_j (j = a, b, c) = 1$ (上桥臂开关管导通, 下桥臂开关管关断), $S_j = 0$ (下桥臂开关管导通, 上桥臂开关管关断); U_{dc} 为直流电压; R 、 L 为滤波电抗器的电阻和电感; C 为直流侧电容; R_L 为负载; U_{ra} 、 U_{rb} 、 U_{rc} 为整流器的输入电压; i_L 为负载电流。

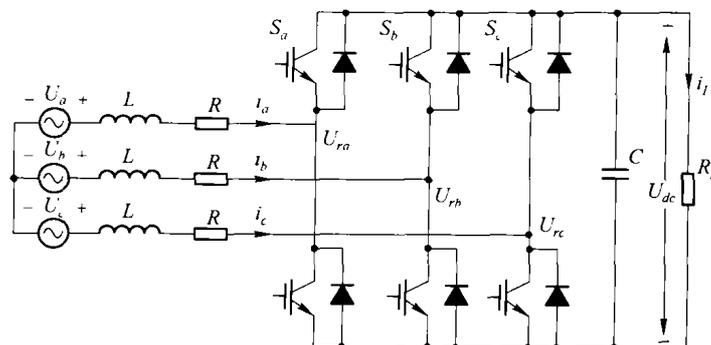


图 1 三相电压型 PWM 整流器主电路

根据图 1, 并考虑到三相电压、电流对称, 三相电压型 PWM 整流器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模

① 收稿日期: 2004-04-08

② 作者简介: 孙向群(1962—), 男, 河北秦皇岛人, 秦皇岛港务集团有限公司第八分公司助理工程师。

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ra} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} \text{ 或}$$

$$u = R i + L \frac{di}{dt} + u_r \quad (1)$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = (i_\alpha S_\alpha + i_\beta S_\beta) - i_L \quad (2)$$

式中 $S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)$,

$$S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c)。$$

根据式(1)、式(2)得三相电压型 PWM 整流器在 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型的框图如图 2 所示。

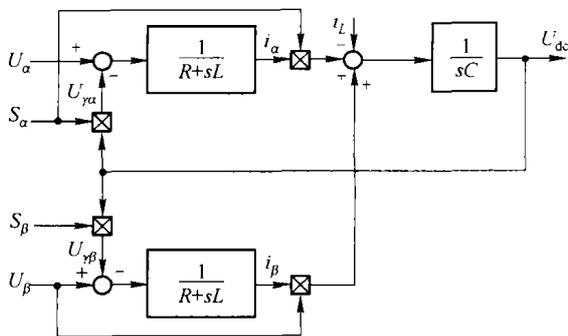


图 2 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型的框图

1.2 三相电压型 PWM 整流器 DPC 系统的组成与原理

借鉴国外三相电压型 PWM 整流器直接功率控制研究现状^{[1][2]},DPC 系统组成如图 3 所示。图中略去了 R 的影响。瞬时有功与无功功率根据检测到的电流 i_a, i_b, i_c 及 u_a, u_b, u_c 进行计算,得到瞬时有功和无功功率的估算值 p, q 及三相电压 u_a, u_b, u_c 在固定 $\alpha\beta$ 坐标系中的 u_α, u_β 。 p 和 q 与给定的 p_{ref} 和 q_{ref} 比较后送入滞回比较器输出 S_p, S_q 开关信号, p_{ref} 由直流电压外环设定, q_{ref} 设定为 0, 以实现单位功率因数。 u_α, u_β 送入扇形选择器输出 θ_n 信号。根据 S_p, S_q, θ_n 在开关表中选择所需的 S_a, S_b, S_c , 去驱动主电路开关管。

1.2.1 功率计算及 S_p, S_q 确定

采用瞬时有功功率为电压矢量与电流矢量的标量积,瞬时无功功率为电压矢量与电流矢量的矢量积^[3],则 p, q 按下式计算

$$p = i^T u = i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta \quad (3)$$

$$q = i^T \Gamma u = i_\beta u_\alpha - i_\alpha u_\beta \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

S_p, S_q 按下列规则确定^[1]

$$S_p = \begin{cases} 1 & p < p_{ref} - H_p \\ 0 & p > p_{ref} + H_p \end{cases}, S_q = \begin{cases} 1 & q < q_{ref} - H_q \\ 0 & q > q_{ref} + H_q \end{cases} \quad (5)$$

式中 H_p, H_q 为有功和无功功率滞回比较器的滞回宽度, H_p, H_q 决定了功率控制精度,亦决定了开关频率。

为实现电源电压空间矢量位置的选择,由 u_α, u_β 确定 u 的幅角 $\theta = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}$, 根据 θ 确定 u 的位置。为优化整流器输入电压矢量把输入空间分为 12 个扇区如图 4 所示, θ_n 由 $(n-2)\frac{\pi}{6} \leq \theta_n \leq (n-1)\frac{\pi}{6}$ 确定, $n = 1, 2, \dots, 12$ 。

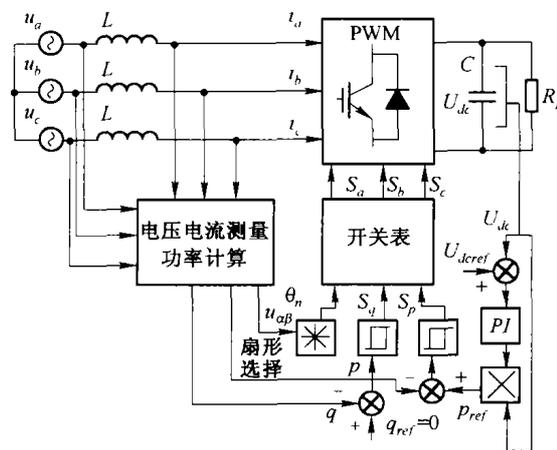


图 3 DPC 系统组成

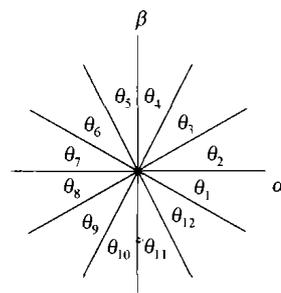


图 4 输入空间划分

1.2.2 开关表的确定

开关表是根据式(5)及 θ_n 确定 DPC 系统所需的开关状态,即 S_a, S_b, S_c 的取值。 S_a, S_b, S_c 的取决于所需的 u_r ; u_r 为离散值 U_0, U_1, \dots, U_7 , 其值由 S_a, S_b, S_c 及 U_{dc} 决定,即 $S_a S_b S_c = 000 \sim 111$ 对应于 $U_0 \sim U_7$, 即 $U_0(000), U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001), U_6(101), U_7(111)$, 其分布如图 5 所示。设 u 在 θ_1 区域, I_r 为与 p_{ref} 相应的电流矢量,当 $i = I$ 时, I 滞后并小于 I_r , $p <$

$p_{ref}, q > q_{ref}$, 即 $S_p = 1, S_q = 0$, 则选择 u_r 使 i 趋近于 I_r , 亦 p 趋近于 p_{ref}, q 趋近于 q_{ref} 。

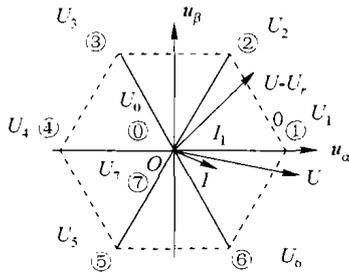


图 5 u_r 的确定

由式(1), 略去 R 的影响, 可得

$$i = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t (u - u_r) dt \quad (6)$$

式(6)中 $i(0) = I$, 当 u_r 选择 U_6 (101) 时, i 将沿着 $u - u_r$ 方向趋近 I_r , 则确定 $S_a S_b S_c = 101$ 。 i 在其他位置可同样进行分析。另外, 适当的引入零空间矢量 U_0 (000) 或 U_7 (111), 可增加功率传输能力。于是得到开关表见表 1。

表 1 DPC 系统开关表

$S_p S_q$	θ_h	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1 0		101	111	100	000	110	111	010	000	011	111	001	000
1 1		111	111	000	000	111	111	000	000	111	111	000	000
0 0		101	100	100	110	110	010	010	011	011	001	001	101
0 1		100	110	110	010	010	011	011	001	001	101	101	100

2 DPC 系统仿真

根据图 2、式(3)~(6)、表 1, 按着图 3 构建了三相电压型 PWM 整流器直接功率控制系统基于 MATLAB/Simulink 环境下的仿真模型。仿真参数: $U_a = U_b = U_c = 85 \text{ V}$, 电源频率 $f = 50 \text{ Hz}$, $L = 4 \text{ mH}$, $R = 0.1 \Omega$, $C = 2200 \mu\text{F}$, $R_L = 10 \Omega$, $U_{dcref} = 200 \text{ V}$, $I_{LN} = 20 \text{ A}$ 。

在 Simulink 环境下的仿真模型对系统进行了仿真, 从启动暂态到稳态的仿真结果如图 6 所示; 由图 6(a) 可知, i_a 经历两个周期 (40 ms) 的暂态后进入稳态, 稳态时 u_a 与 i_a 同相位, 且 i_a 非常接近正弦波; 由图 6(b) 可知, 直流输出电压 u_{dc} 经历 4 周期进入稳态, 即稳定在给定值 u_{dcref} ; 由图 6(c) 可知, p 经历 4 周期进入稳态, 即稳定在给定值 p_{ref} , q 经历 1.5 周期进入稳态, 即稳定在给定值, 并接近于 0。从图 6(a)、图 6(c) 可以看出, 网侧功率因数非常接近于 1。

3 结语

3.1 本文介绍了 DPC 系统的组成和原理, 具有结构简单、算法简单、无 PWM 调制模块 (只利用预存好的开关表)、功率环只对瞬时功率标量值进行动态比较、实现高功率因数、低谐波干扰、动态性能好等优点。

3.2 过计算机仿真, 可以看出 DPC 系统具有良好的性能。从仿真曲线可知, 电流动态响应快, 而直流电压动态响应相对慢一些, 这对负载会产生影响, 对此, 可采用负载电流前馈控制 [4] 和非线性控制 [5] 予以解决。

参考文献:

- [1] Toshihiko Noguchi, Hiroaki Tomiki, Seiji Kondo, and Isao Takahashi. Direct Power Control of PWM Converter Without Power-Source Voltage Sensors. IEEE Trans on Industry Applications. Vol. 34. No. 3, pp473~479 May/June 1998.
- [2] Toshihiko Noguchi, Hiroaki Tomiki, Seiji Kondo, and Isao Takahashi. Direct Power Control of PWM Converter Without Power Source Voltage Sensors. 1996 IEEE. pp941~946.
- [3] 李培芳, 孙士乾. 三相电路瞬时电流功率的分解与 Park 空间分析 [J]. 浙江大学学报 (工学版). 2001. 1 14~16.
- [4] 董晓鹏, 王兆安. 具有快速动态响应的单位功率因数 PWM 整流器 [J]. 西安交通大学学报. 1997. 11 77~82.
- [5] D. C. Lee, G. M. Lee, and K. D. Lee. DC-Bus Voltage Control of Three-Phase AC/DC PWM Converters Using Feedback Linearization. IEEE Trans on Industry Application. Vol. 36. 826~833 May/June 2000.

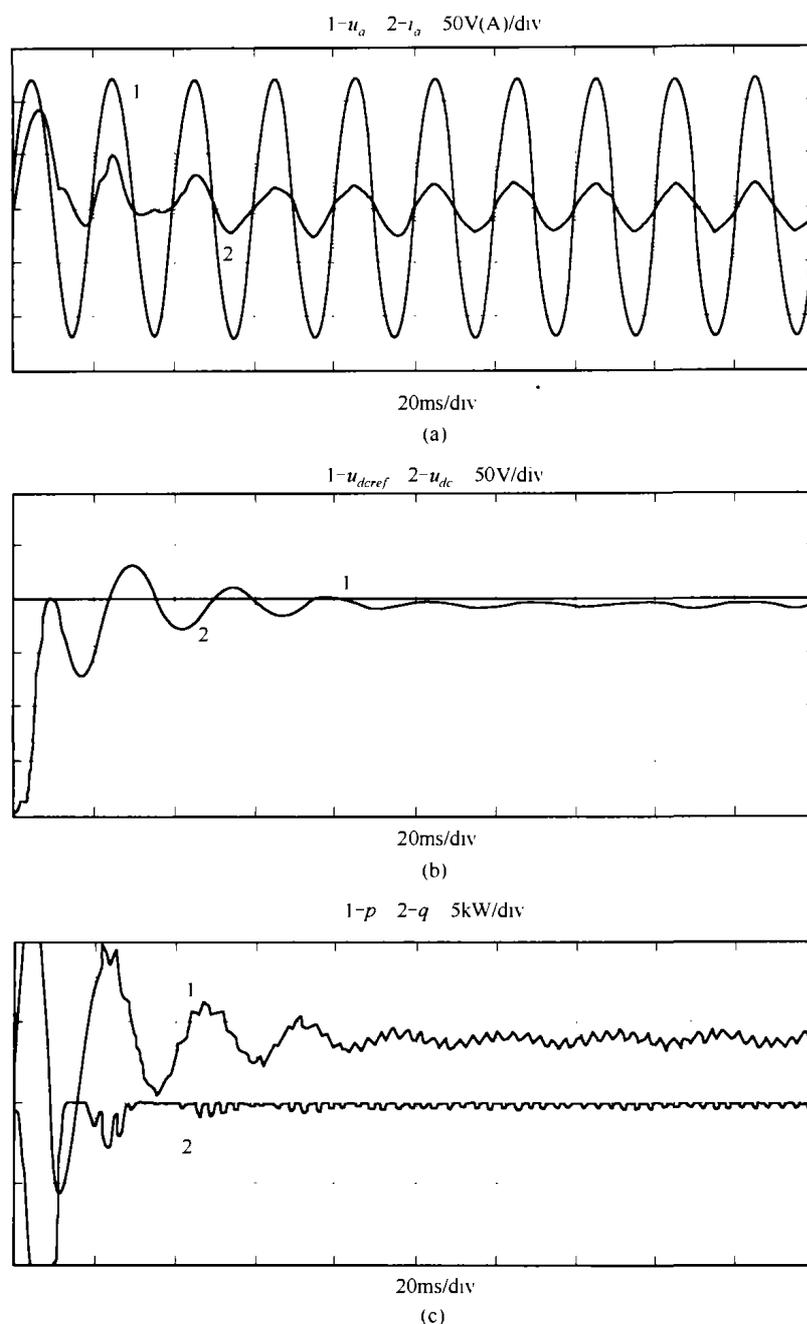


图6 DPC系统从启动暂态到稳态仿真曲线

(a)电源相电压、线电流;(b)直流给定电压和实际电压;(c)瞬时有功和无功功率

Research on Power Control; Strategy for three Phase BOOST-TYPE PWM Rectifiers

SUN Xiang-qun¹, WANG Jiu-he²

- (1. The 8th Subcompany of Qin Huang Dao Port Group CO., Qin Huang Dao Hebei 066001;
2. School of Information Engineering University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: This paper analyses the principle and constitution for three phase boost type PWM rectifiers based on power control strategy, and studies their performances during start by simulation model based on MATLAB/Simulink. Simulation results show that DPC has good dynamics performances and the advantages that include simple frame, simple algorithms, without PWM modulation model, high power factor, low harmonic distortion and so on.

Key Words: PWM rectifier; direct power control; instantaneous power; simulation