

基于空间矢量的直接功率控制策略

张明莲, 吕瑞强, 王 慧

(徐州空军学院 航空四站系, 江苏 徐州 221002)

摘 要: 将直接功率控制应用于三相 PWM 整流器中, 采用 PWM 空间矢量调制代替传统的开关逻辑表控制, 避免了因开关频率不固定给整流器造成的不良影响。文章推导了该控制系统基于虚磁链的功率估算式, 分析了功率调节器参数设计, 研究了有功和无功功率调节器之间的相互耦合影响关系。仿真结果表明, 在三相不平衡电压情况下, 该控制方法具有功率因数高、电流谐波小、动态性能好等优点。

关键词: PWM 整流器; 直接功率控制; 虚磁链; 空间矢量

中图分类号: TM461

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)04-0037-03

Direct Power Control Strategy based on Space Vector Modulation

ZHANG Ming-lian, LV Rui-qiang, WANG Hui

(Department of Aviation Four Stations, Xuzhou Air Force College, Xuzhou, Jiangsu 221002, China)

Abstract: Direct power control technology is applied on three-phase PWM rectifier. Using space vector modulation instead of switching tables can eliminate the bad effect of unconstant switching frequency on the rectifier. It is induced a new estimated power formula based on virtual flux, analyzed the parameter design of power-adjuster and also researched the coupling relations between the active and reactive power-adjuster. The simulation result shows that this method exhibits several features under the unbalanced input voltage of three-phase, such as high power factor, low current harmonic and good dynamic performance.

Key words: PWM rectifier; direct power control; virtual flux; space vector

0 引言

与感应电机磁场定向的直接转矩控制相似, 三相 PWM 整流器的基于电压的直接功率控制(Voltage-based Direct Power Control, V-DPC)^[1]和基于虚拟磁链定向的直接功率控制(Virtual-Flux-based Direct Power Control, VF-DPC)^[2]是通过直接对整流器输入输出功率进行控制, 即通过估算功率和给定功率的偏差来实时确定开关状态的选择, 以实现整流器直流侧和网侧能量的平衡。V-DPC 和 VF-DPC 都采用功率滞环控制器实现 PWM 波形, 开关周期的长度为功率误差变化一周的时间, 开关

频率不固定。开关频率不固定会使整流器运行噪声增加, 而且产生的电磁干扰频带宽, EMI 问题难解决。基于这种情况, 本文介绍一种基于空间矢量的直接功率控制(Direct Power Control Using Space Vector Modulation, DPC-SVM)^[3], 与 V-DPC 和 VF-DPC 相比, 这种控制策略采用 SVPWM 控制代替开关逻辑状态选择, 因此可以较好解决开关频率不固定带来的诸多问题。

1 DPC-SVM 控制原理

DPC-SVM 系统控制框图如图 1 所示, 图中, p 和 q 分别为瞬时有功和无功功率估算值; p^* 、 q^* 分别为瞬时有功和无功功率给定值; v_{sd} 、 v_{sq} 分别为整流器入端电压 d 、 q 轴分量; $v_{s\alpha}$ 、 $v_{s\beta}$ 分别为经旋转-静止坐标变换后得到的参考电压 v_s 的 α 、 β 分量。该系统与 VF-DPC 控制系统不同

收稿日期: 2010-06-11

作者简介: 张明莲(1976-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力电子与电气传动。

之处在于采用了PWM空间矢量调制代替开关逻辑表控制^[4],利用空间矢量调制可得到PWM开关信号,实现对整流器中开关器件的控制。

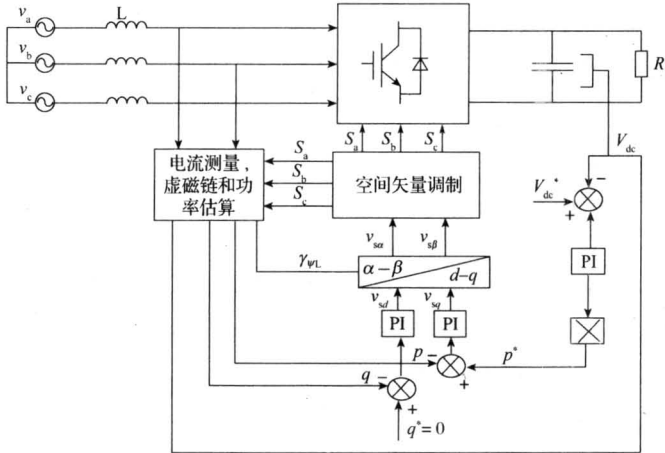


图1 DPC-SVM控制框图

Fig. 1 Block scheme of DPC-SVM

运用复数定义,瞬时功率可以计算为: $p = \text{Re}(\mathbf{v}_L \cdot \bar{\mathbf{i}}_L)$; $q = \text{Im}(\mathbf{v}_L \cdot \bar{\mathbf{i}}_L)$, 式中 $\bar{\mathbf{i}}_L$ 为整流器交流侧电流矢量的共轭。整流器桥臂入端电压矢量 $\mathbf{v}_L$ 为:

$$\mathbf{v}_L = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\psi}_L = \frac{d}{dt} (|\boldsymbol{\psi}_L| e^{j\omega t}) = \frac{d|\boldsymbol{\psi}_L|}{dt} e^{j\omega t} + j\omega \boldsymbol{\psi}_L \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}_L$ 为虚拟磁通^[2]; ω 为电网同步角频率。

当三相电网电压平衡对称且为正弦,并且整流器桥臂入端电压也平衡对称时(即 $\frac{d|\boldsymbol{\psi}_L|}{dt} = 0$), 则:

$$\mathbf{v}_L = j\omega(\boldsymbol{\psi}_{L\alpha} + j\boldsymbol{\psi}_{L\beta}) \quad (2)$$

$$\mathbf{v}_L \cdot \bar{\mathbf{i}}_L = j\omega(\boldsymbol{\psi}_{L\alpha} + j\boldsymbol{\psi}_{L\beta})(i_{L\alpha} - ji_{L\beta}) \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}_{L\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\psi}_{L\beta}$ 分别为 $\boldsymbol{\psi}_L$ 的 α 、 β 轴分量。

因此瞬时功率可计算为:

$$p = \omega(\boldsymbol{\psi}_{L\alpha} i_{L\beta} - \boldsymbol{\psi}_{L\beta} i_{L\alpha})$$

$$q = \omega(\boldsymbol{\psi}_{L\alpha} i_{L\alpha} + \boldsymbol{\psi}_{L\beta} i_{L\beta})$$

2 功率调节器参数的设计

由虚拟磁链定向系统 $\boldsymbol{\psi}_L = \boldsymbol{\psi}_{Ld}$, $\boldsymbol{\psi}_{Lq} = 0$, 则 $\mathbf{v}_{Lq} = V_m$, $V_{Ld} = 0$, 其中 V_m 为整流桥入端相电压幅值。从而推导出 $p = V_m i_{Lq}$, $q = V_m i_{Ld}$, 代入 dq 旋转坐标系下整流器的数学模型^[5], 可以得到:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} - \omega Li_{Lq} + v_{sd} \\ V_m &= Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + \omega Li_{Ld} + v_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: R 、 L 分别为整流器系统等值电阻和电感。

根据式(4)可以得到整流器简化模型,如图2所示。图中, ωLi_{Ld} 、 ωLi_{Lq} 为两功率环间耦合量,稳态时为直流量。为了实现整流器单位功率因数,令 $i_{Lq} = 0$ (即实现无

功 $q=0$), 则等效有功功率控制环如图3所示。当交流电源电压稳定时, V_m 为恒定值,因而对功率环而言可以看作是常值扰动,其扰动可通过PI调节器中的积分成分得到补偿。

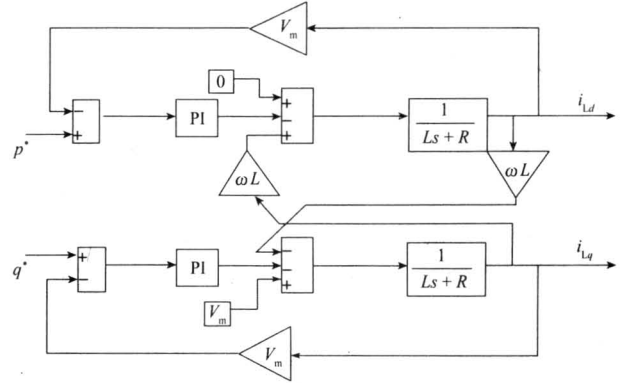


图2 PWM整流器简化模型

Fig. 2 Simplification model of PWM rectifier

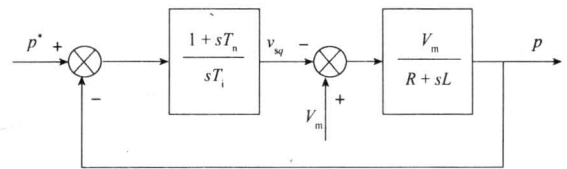


图3 有功功率调节器

Fig. 3 Active power-adjuster

为了零极点对消和设计方便,令: $T_n = \frac{R}{L} = T_{ol}$, T_{ol} 是系统的开环时间常数,量很小。因此,有功功率调节环可以简化为一阶系统,如图4所示。

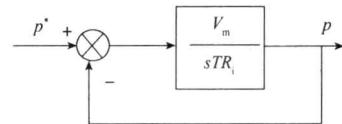


图4 等效有功功率调节器

Fig. 4 Equivalent active power-adjuster

其闭环传递函数为:

$$\frac{G_{eq}}{1+G_{eq}} = \frac{\frac{V_m}{sT_i R}}{1 + \frac{V_m}{sT_i R}} = \frac{1}{1 + \frac{sT_i R}{V_m}} \quad (5)$$

式中: G_{eq} 为开关传递函数; $T_i = \frac{V_m T_{cl}}{R}$, 其中 T_{cl} 为系统闭环时间常数,它反映了系统的惯性,其值越小,系统响应过程越快;反之,其值越大,系统响应越慢。

$$\text{PI调节器参数为: } k_p = \frac{T_n}{T_i} = \frac{1}{V_m} \frac{L}{T_{cl}}; k_i = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{V_m} \frac{R}{T_{cl}}.$$

当 T_{cl} 取不同值时, $\frac{k_p}{k_i}$ 是一个常量且等于开环时间常数 T_{ol} 。 T_{cl} 除了对系统的快速性能有较大影响外,还决定无功和有功功率环之间的解耦控制程度,因而是一个

很重要的参数。

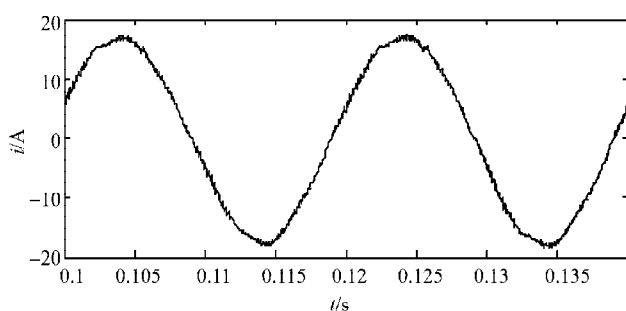
3 仿真分析

基于Matlab环境下,根据图1构建了三相电压型PWM整流器直接功率控制系统的仿真模型,在输入电压三相不平衡时,仿真主要验证稳态运行波形。三相不平衡电压定义为:

$$v_a' = V_m \cos(\omega t) + k^* V_n \cos(\omega t)$$

$$v_b' = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + k^* V_n \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$v_c' = V_m \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + k^* V_n \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$



式中: k^* 为三相不平衡度。

仿真电路主要参数为: 相电压幅值 $V_m=250$ V; 等值电阻 $R=0.1 \Omega$; 电感 $L=10$ mH; 直流侧电容 $C=1$ mF; 负载 $R_L=50 \Omega$; 直流电压给定 $V_{dc}^*=600$ V; 采样频率 $f_N=10$ kHz; 平均开关频率 $f=4$ kHz。根据上文分析,功率调节器的参数为: $T_{cl}=10^{-4}$ s; $k_p=0.4$; $k_i=4$ 。当 $V_n=300$ V, $k=0.05$ 时,整流器输入a相线电流波形及谐波频谱如图5所示,可以看出当电源电压三相不平衡时,系统网侧电流THD为4.12%。

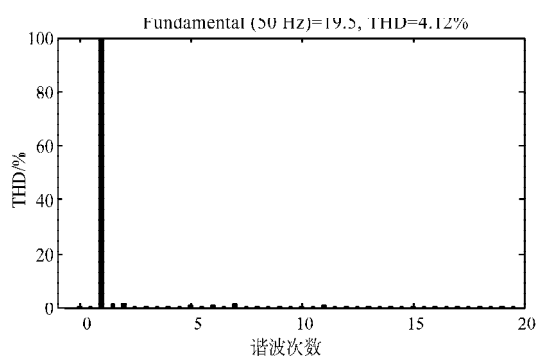


图5 网侧a相电流波形及其THD值

Fig. 5 The waveform of a-phase current and THD

4 结语

与传统的V-DPC和VF-DPC系统相比,DPC-SVM系统中采用PWM空间矢量调制,保证了恒定的开关频率,同时结构算法更简单。仿真结果表明,该系统还可以更好地减轻电网电压不理想(电网电压畸变或不平衡)对整流器产生的影响,因此该控制系统具有很好的使用前景和价值。

参考文献:

[1] Noguchi T, Tomiki H, Kondo S. Direct power contrl of PWM

converter without power source voltage sensors[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 1998, 34(3): 473-479.

[2] Malinowski M, Kazmierkowski M P. Virtual flux based direct power control of three phase PWM rectifier[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 2001, 37(4): 1019-1027.

[3] Malinowski M, Kazmierkowski M P. Simple direct power control of three phase PWM rectifier, Using space-vector modulation[J]. IEEE Trans. Ind. Appl., 2004, 51(2): 447-454.

[4] Ambrozic V, Fiser R, Nedeljkovic D. Direct current control a new current regulation principle[J]. IEEE Trans. Power Electron, 2003, 18(1): 495-503.

[5] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.