

无源性非线性控制策略的研究与应用

杨婷婷, 郭前岗, 周西峰

(南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京 210046)

摘要:针对传统控制器在设计时常忽略与系统能量相关的问题,文中给出一种无源性控制策略,并将其应用于阻性负载的单相电流型PWM逆变器中。该控制策略主要是从能量角度分析逆变系统,根据在系统中注入阻尼,重新分布逆变系统能量的方法,使系统能够全局稳定。该方法无需将系统中的非线性因素完全抵消,即可实现电压、电流的渐近跟踪。仿真结果证明此无源性控制策略具有较好的鲁棒性,以及良好的稳态和动态性能,即使负载发生大范围变化,系统仍能保证稳定运行。据此也说明所述方法的正确性和有效性。

关键词:电流源逆变器;无源性控制;阻尼注入;非线性控制

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)08-0193-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.08.049

Research and Application of Passivity Nonlinear Control Strategy

YANG Ting-ting, GUO Qian-gang, ZHOU Xi-feng

(College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: As the design of traditional controller often ignores the problems associated with the energy of the system, propose a passivity-based control strategy for single-phase PWM current-source inverters feeding a resistive load. The key point of this strategy is to analyze the control system from the energy aspect and ensure the stability of the global system according to the redistribution of the energy by injecting damping in needed. This method tracks the voltage and current asymptotically without offsetting the nonlinear dynamic characteristics of the system. The results of simulation are demonstrated to prove that the proposed control strategy provides good robustness and well steady state operation and dynamic response, even though the load changes in a wide range, the nonlinear controller can make system operation steadily. Pursuant to which also shows the correctness and validity of the control strategy described in this article.

Key words: current-source inverter; passivity-based control; damping injection; nonlinear control

0 引言

随着电力电子技术的快速发展以及用户对电能质量要求的提高,逆变器在更多的领域都得到了广泛的运用,同时对逆变器的控制性能也相应提出了更高的要求。以往,人们更多关注电压源逆变器的研究工作,对电流源逆变器的研究并不多。但是,随着数字处理器和电力电子技术的发展,电流源逆变器因其有着不可取代的优点使它在光伏发电系统、电流电机驱动器^[1~3]场合,都得到了更广泛的应用。

逆变器的传统控制策略一般都是通过对其输出电压、电流值反馈后,再利用线性策略对其进行控制,但是通过线性策略控制的逆变器输出波形一般都具有较高的

失真和较差的动态性能。且由于逆变器的开关特性是周期性时变结构,即逆变器自身是非线性系统^[4],其对非线性控制方式具有天然适应性^[5,6]。所以,文中选用非线性控制策略对逆变器进行控制。

无源性控制是一种本质上的非线性控制方式,其理论基础是李雅普洛夫第二方法。该控制策略从能量角度分析逆变系统,基本思想是通过在系统中注入阻尼,重新分布逆变系统的能量函数,使之符合李雅普洛夫稳定定律,让系统达到渐近稳定。由于在设计无源性控制器的过程中,并没有完全抵消非线性因素即可实现电压、电流的渐近跟踪,所以该方法设计简单,避免了复杂的控制规律。

收稿日期:2012-10-23

修回日期:2013-01-30

网络出版时间:2013-04-22

基金名称:国家自然科学基金资助项目(61105082)

作者简介: 杨婷婷(1988-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子变换控制与新能源发电技术;郭前岗,教授,研究方向为电力电子变换控制、新能源发电技术和智能与网络化控制系统;周西峰,副教授,研究方向为计算机监测控制系统的工程设计方法及其在工业生产领域中的应用。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20130422.1722.035.html>

文中以电流源逆变器为例,根据其动态模型,从能量角度分析了逆变器的内部结构。并且在无源性控制理论的基础上,分析逆变器的非线性控制策略,同时根据李雅普洛夫稳定定律,验证系统的全局稳定性。此外,由于阻尼值的选取对无源性控制策略起着非常关键的作用,而目前对如何选取阻尼值的研究并没有成熟,所以文中也只是对阻尼值的选取做定量分析,最后通过计算机仿真验证上述分析与设计的正确性。

1 系统描述和工作原理

单相电流源逆变器拓扑结构如图 1 所示,系统主电路包括直流电压源(V_s),电感(L),全桥和电容滤波器(C)。 T_1 与 T_4 、 T_2 与 T_3 同时导通截止,开关器件 $T_1(T_4)$ 与 $T_2(T_3)$ 控制信号互为补充。且每个开关器件都串联了二极管,使得逆变器电流只能单向流动。

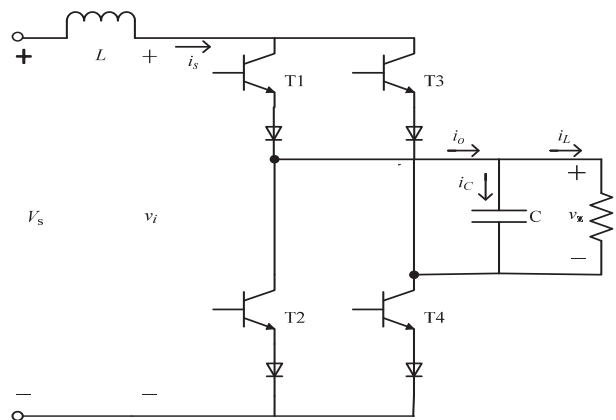


图 1 单相电流型逆变器

在下面的分析中,假设所有的元器件都是理想的。根据基尔霍夫回路 KVL 定律和节点 KCL 定律,单相 CSI 可描述为:

$$L \frac{di_s}{dt} + ri_s = V_s - v_i \quad (1)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = i_o - \frac{v_o}{R_L} \quad (2)$$

其中, r 为电感电阻,输入直流电压 $v_i = dv_o$,输出交流电流 $i_o = di_s$,定义开关函数 d 为输入控制变量,其取值范围为 $[-1, 0, 1]$ 。文中通过正弦信号和三角载波信号之间的对比得到驱动开关器件的 PWM 信号。上述系统的控制目标是设计合理的输入控制信号 $d(t)$,使得电感电流、输出电压渐近跟踪其参考值。

2 无源性理论与控制策略

2.1 无源性理论

如果一个系统的能量随着时间耗散,且自己不能产生能量,那么该系统就是无源的。无源性控制策略的主要思想是:首先分离出系统中对有功能量没有消

耗作用的“无功项”,由于该项对系统的稳定性等都没有影响,所以通过对该“无功项”注入适当的阻尼,让系统的总能量函数符合预期的能量函数,从而使得系统能够渐近稳定。例如,根据下面非线性系统描述无源性概念的一般表达式^[7]:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3)$$

$$y = h(x) \quad (4)$$

式中 $x \in R^n = X, \mu, y \in R^m = U$,如果存在连续非负函数 $V: X \rightarrow R$, 满足 $V(0) = 0$, 使得 $V(x(T)) - V(x(0)) \leq \int_0^T y^T(t)u(t)dt$, 对任意的输入信号都成立,其中 $\forall T > 0, y^T(t)$ 是 $y(t)$ 的转置, $V(x)$ 是能量存储函数,那么上述系统是无源的。

2.2 电流型逆变器的无源性

根据参考文献[8],可得电流源逆变器的能量守恒方程:

$$V(x_1, x_2) - V(x_1(0), x_2(0)) = \int_0^T y u dt - \int_0^T r x_1^2 dt - \int_0^T \frac{1}{R_L} x_2^2 dt \quad (5)$$

显然有:

$$V(x(T)) - V(x(0)) \leq \int_0^T y u dt \quad (6)$$

其中, $V(x_1, x_2) = \frac{L}{2} x_1^2 + \frac{C}{2} x_2^2, u = V_s$ 是该系统的输入信号, y 为输出信号。

所以该系统是无源的。

2.3 基于无源性的 CSI 控制器设计

电流型逆变器的控制目标是在保证输出电压波形质量的前提下,实现系统的全局稳定。由于直接控制输出电压可能导致系统不稳定^[9],所以控制器是通过跟踪电感电流参考值来间接地控制交流输出电压。定义电流型逆变器的状态变量为^[10,11]:

$$x_1 = i_s - i_{sd} \quad (7)$$

$$x_2 = v_o - v_{od} \quad (8)$$

其中 i_{sd} 和 $v_{od} = V_m \sin(\omega t)$ 分别是电感电流 i_s 输出电压 v_o 参考值。将式(7)、(8)带入式(1)和(2)得:

$$L \frac{dx_1}{dt} + r x_1 + dx_2 = V_s - (L \frac{di_{sd}}{dt} + r i_{sd} + dv_{od}) \quad (9)$$

$$C \frac{dx_2}{dt} - dx_1 + \frac{1}{R_L} x_2 = - (C \frac{dv_{od}}{dt} - di_{sd}) \quad (10)$$

在式(9)、(10)中引入阻尼项可得:

$$L \frac{dx_1}{dt} + r x_1 + dx_2 + \zeta_1 x_1 = V_s - (L \frac{di_{sd}}{dt} + r i_{sd} + dv_{od} - \zeta_1 x_1) \quad (11)$$

$$C \frac{dx_2}{dt} - dx_1 + \frac{1}{R_L} x_2 + \zeta_2 x_2 =$$

$$-C\frac{dv_{od}}{dt} + di_{sd} - \frac{1}{R_L}v_{od} + \zeta_2x_2$$

(12)

式中:阻尼系数 $\xi_1 > 0, \xi_2 > 0$ 。通过适当选取阻尼项使得

$$V_s = L\frac{di_{sd}}{dt} + ri_{sd} + dv_{od} - \zeta_1x_1$$

(13)

$$0 = C\frac{dv_{od}}{dt} + di_{sd} - \frac{1}{R_L}v_{od} + \zeta_2x_2$$

(14)

为了使式(13)、(14)成立,必须满足

$$L\frac{dx_1}{dt} = -rx_1 - dx_2 - \zeta_1x_1$$

(15)

$$C\frac{dx_2}{dt} = dx_1 - \frac{1}{R_L}x_2 - \zeta_2x_2$$

(16)

定义系统的能量函数为:

$$V(t) = \frac{1}{2}Lx_1^2 + \frac{1}{2}Cx_2^2$$

(17)

对 V 导可得

$$\dot{V}(t) = x_1L\dot{x}_1 + x_2C\dot{x}_2$$

(18)

将公式(15)、(16) 带入式(18) 得到

$$\dot{V}(t) = x_1(-rx_1 - dx_2 - \zeta_1x_1) + x_2(dx_1 - \frac{1}{R_L}x_2 - \zeta_2x_2)$$

(19)

化简得:

$$\dot{V}(t) = -rx_1^2 - \zeta_1x_1^2 - (\zeta_2 + \frac{1}{R_L})x_2^2$$

(20)

根据 Lyapunov 稳定性定律:当 $V > 0, \dot{V} < 0$, 即 x_1 和 x_2 渐近收敛到零时,系统是渐近稳定的。

根据式(14) 可求得系统的无源性控制 $d(t)$

$$d(t) = \frac{1}{i_{sd}}(C\frac{dv_{od}}{dt} + \frac{1}{R_L}v_{od} + (v_o - v_{od}))$$

(21)

通过调节该控制率,可以迫使 $x_1 \rightarrow 0, x_2 \rightarrow 0$, 即 $i_s \rightarrow i_{sd}, v_o \rightarrow v_{od}$ 。

根据文献[12],电感电流的参考值为:

$$i_{sd} = I_{sd} + I_{sh}\sin(2\omega t + \theta)$$

(22)

其中 I_{sd} 是 i_{sd} 的直流成分, I_{sh} 是谐波成分,且其频率是输出电压频率的两倍。为了求得控制变量 $d(t)$,就要求估算 $I_{sh}\sin(2\omega t + \theta)$ 的值,因此增加了控制器的复杂性。

所以,为了简化控制器的设计,忽略了电流 i_{sd} 的谐波脉动成分。因此, $d(t)$ 的表达式为:

$$d(t) = \frac{1}{I_{sd}}(C\frac{dv_{od}}{dt} + \frac{v_{od}}{R_L} + \zeta_2(v_o - v_{od}))$$

(23)

在产生 PWM 信号时, $d(t)$ 表达式中除数部分 I_{sd} , 可以很容易地通过调节三角载波振幅来实现。关于 I_{sd} 的推导将在下文中进行。单相 CSI 的控制策略框图如图 2 所示。

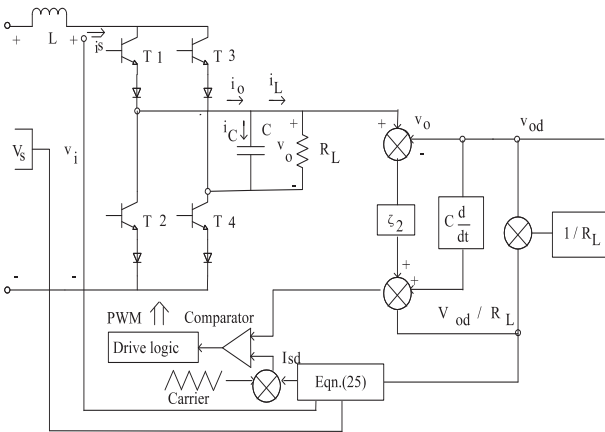


图 2 单相 CSI 的控制策略框图

3 电流源逆变器的稳态分析

假设 $v_o = v_{od}$ 和 $i_s = I_{sd}$, 对于电流型逆变器, 稳态情况下, 能量在逆变器中从输入到输出传递过程中是守恒的。因此, 忽略逆变器的开关损耗, 逆变器输出侧为纯电阻负载, 稳态时可以得到:

$$V_s I_{sd} = rI_{sd}^2 + (V_m^2/2R_L)$$

(24)

由此可得:

$$I_{sd} = \frac{1}{2} \left[\frac{V_s}{r} \pm \sqrt{\left(\frac{V_s}{r}\right)^2 - \frac{2V_m^2}{rR_L}} \right]$$

(25)

该等式存在的前提条件为: $(V_s^2/2rV_m) > (V_m/R_L)$, 并且根据该不等式还可以求得逆变器负载的上限值。

4 仿真实验

4.1 系统参数

为验证所提控制策略的可行性, 采用 MATLAB 语言对系统进行仿真。仿真参数为: $V_m = 150V, V_s = 48V, L = 10mH, C = 200\mu F, r = 1\Omega, R_L = 50\Omega, \xi_1 = 0, \xi_2 = 0.015$, 逆变器开关频率 $f_s = 10kHz$ 。

4.2 系统仿真波形

(1) 稳态响应。

图 3 为负载 $R_L = 50\Omega$ 时, 逆变器的输出电压和负载电流稳态波形。从中可以看出基于无源性控制策略的单相全桥逆变器输出是稳定的。

(2) 负载瞬态响应。

图 4 描述了负载从 $R_L = 500\Omega$ 到 50Ω 变化时, 逆变系统的输出响应曲线。其中, 图 4a 为负载电阻的变化曲线, 图 4b 为负载突变时输出电压与输出电流的波形。

由图 4 可得, 采用文中所述的非线性控制策略, 即使负载发生突变, 系统的输出电压也不受影响, 保持稳态, 具有较强的抗负载扰动能力; 而输出电流也能够很快地平滑过渡到新的稳定状态。

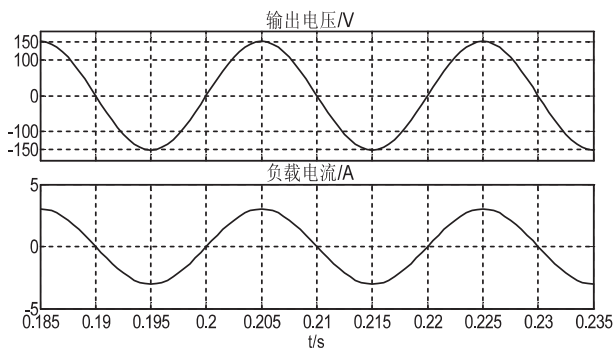
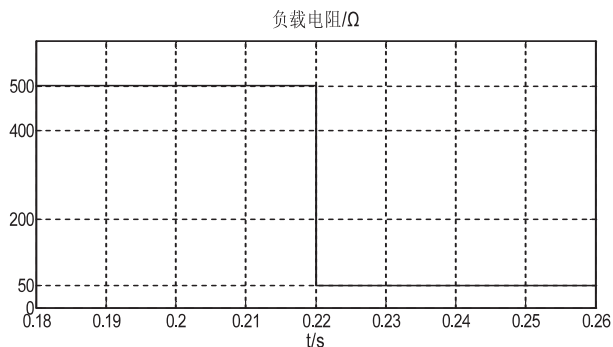
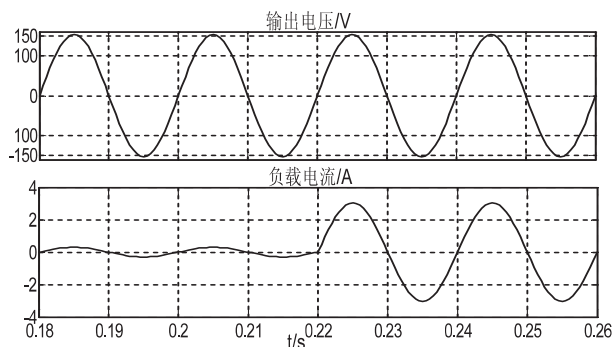


图 3 系统的输出电压和负载电流稳态时的波形



(a) 负载电阻的变化曲线



(b) 输出电压、输出电流波形

图 4 负载突变时的系统响应波形

5 结束语

在实际生活中单相电流源逆变器得到了广泛的运用。在非线性控制理论的基础上,文中描述了一种无源性控制策略,并给出策略的详细分析与设计过程,同

时利用计算机验证该策略的正确性。仿真结果证明该控制策略设计简单,具有良好的动态和稳态性能,对负载扰动具有良好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 史云鹏,李 君,徐德鸿,等. 超导储能系统用四模块组合变流器功率控制设计和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(21):160-165.
- [2] Tenca P, Rockhill A A, Lipo T M, et al. Current source topology for wind turbines with decreased mains current harmonics, further reducible via functional minimization[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2008,23(3):1143-1155.
- [3] 吕兴德,骆德汉,姚长标,等. 一种基于光伏系统的逆变电源设计[J]. 计算机技术与发展, 2012,22(4):179-181.
- [4] 张发明,王 俊,吴 刚,等. 光伏并网逆变器的非线性控制研究[J]. 控制工程, 2008,15(3):295-298.
- [5] 张振环,刘会金,李琼林,等. 基于欧拉-拉格朗日模型的单相有源电力滤波器无源性控制新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(9):37-44.
- [6] 高 勇,张文娟,杨 媛. 变速恒频双馈异步电机无源性控制[J]. 太阳能学报, 2010,31(11):1491-1496.
- [7] Qin Huashu, Hong Yiguang. Passivity, stability and optimality [J]. Control Theory and Application, 1994,11(4):421-427.
- [8] 梅生伟,申铁龙,刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [9] Ortega R, Loria A, Nicklasson P J, et al. Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems [M]. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [10] Komurcugil H. Passivity-based control of single-phase PWM current source inverters [C]//Proc. of IEEE Industrial Electronics Society Conf. . Taipei, Taiwan: [s. n.], 2007:545-550.
- [11] Komurcugil H. Steady-state analysis and passivity-based control of single-phase PWM current-source inverters [J]. IEEE Trans. on Ind. Electron. , 2010,57(3):1026-1030.
- [12] Komurcugil H. Integral sliding mode control of a single-phase current source inverter [C]//Proc. of IEEE Industrial Electronics Society Conf. . [s. l.]: [s. n.], 2009:1597-1602.

(上接第 192 页)

- 出版社,2007.
- [4] 吴伟陵,牛 凯. 移动通信原理[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
 - [5] 曾兴雯,刘乃安. 扩频通信及其多址技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004.
 - [6] 青 松,程岱松,武建华. 数字通信系统的 SystemView 仿真与分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.
 - [7] 张辉编. 现代通信原理与技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2006.
 - [8] 啜 钢,王文博,常永宇,等. 移动通信原理与系统[M]. 北

京:北京邮电大学出版社,2005.

- [9] 彭 林. 第三代移动通信技术[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [10] 吴志军,王 剑. IS-95 CDMA 系统 RAKE 接收机仿真[J]. 中国民航学院学报, 2003,29(5):25-27.
- [11] 郭梯云,邬国扬,李建东. 移动通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [12] Viterbi A J. CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication [M]. NY: Addison-Wesley Publishing Company, 1995.

无源性非线性控制策略的研究与应用

作者：[杨婷婷](#)，[郭前岗](#)，[周西峰](#)，[YANG Ting-ting](#)，[GUO Qian-gang](#)，[ZHOU Xi-feng](#)

作者单位：[南京邮电大学 自动化学院, 江苏 南京, 210046](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

ISTIC

年，卷(期)：2013(8)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201308049.aspx