

基于无差拍控制逆变器的负载性质在线识别及参数估算方法

罗光富,王建畴,纪延超

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 无差拍控制是一种基于对象精确数学模型的控制方法,其不足是控制器参数对控制对象参数的依赖性很强,对象参数变化,要求控制器参数也作相应变化,否则,会造成很大的控制误差。该文结合无差拍控制逆变器的特点,提出了一种负载性质在线识别和参数估算的新方法,很好地解决了传统无差拍控制逆变器控制器参数难与控制对象参数精确配合的问题。通过计算机仿真,证明了该方法的切实可行性。

关键词: 无差拍控制; 负载性质识别; 参数估算

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)23-0011-04

0 引言

随着微处理器性能的不断提高,电力电子装置的控制系統逐渐由模拟型向数字型发展,高速数字信号处理器(DSP)的应用使一些复杂的控制方式得以实现,无差拍控制就是其中的一种。无差拍控制理论是由 Kalman 等人于 1959 年首次提出的,直到 1985 年 Gokhale 在 PESC 年会上提出将无差拍控制应用于逆变器控制,逆变器的无差拍控制才引起广泛的重视^[1,2]。逆变器无差拍控制方法的思路是通过电路理论求解决定脉宽的控制方程,并借助微处理器进行脉宽计算使逆变器输出接近理想的正弦波形^[3],它是一种以微处理器为基础的 PWM 控制方法,优点在于数学推导严密、跟踪给定无过冲、动态性能好、对非线性负载输出谐波失真小等。但任何一种控制方法都不可避免地会有一些不足,无差拍控制是一种基于对象精确数学模型的控制方法,其不足是控制器参数对控制对象参数的依赖性很强,对象参数变化,要求控制器参数也作相应变化,否则,会造成很大的控制误差,系统不稳。数值研究表明,若用一组纯电阻负载额定输出功率(20 kW)下得到的控制系数去控制带感性负载的逆变器,则误差可大于 20%^[4]。因此要充分发挥无差拍控制的优点,必须要根据不同的负载情况来决定控制方程及其系数。为解决这个问题,文献[5]提出了一种基于最小二乘法的离线辨识系统结构参数的方法来实现无差拍控制的精确设计,但是系统处于开环控制状态,在受到外部扰动时,系统很容易失去稳定,而且控制器的参数整定较为复杂。文献[6]针对无差拍控制逆变器提出了一种负载性质识别和负载参数估算的方法,很好地解决了负载参数与控制器参数

匹配的问题,但是这种方法需要实时检测的交流参量比较多,需要有多个传感器,增加了系统的体积和成本。本文提出了一种改进的在线识别负载性质及参数估算的方法,在不影响控制器的控制精度的前提下,减少了需要实时检测的交流参量的个数,简化了系统硬件结构,节约了成本,具有很好的实用价值。

1 负载参数在线估算原理

无差拍控制的一个最基本的特点就是系统在受到扰动以后,能够在有限个无差拍采样周期内快速地使系统跟踪参考给定值,而对于一个逆变器而言,其所带的负载往往不是一成不变的,另外由于无差拍控制逆变器的控制方程的系数与负载有关,因此无差拍控制的逆变器要想获得良好的输出效果,必需对负载的情况进行实时跟踪,当负载变化时,有必要对负载参数进行在线估算,以便重新调整控制方程的系数,使得控制系统能够获得真正意义上的对被控对象的无差拍控制。

如图 1 所示,无差拍控制逆变器所带的负载性质通常有阻性、容性和感性 3 种。通常,要在线确定负载的参数,需要实时检测负载上的电压电流。本文结合无差拍控制逆变器的特点,提出了一种在线估算负载参数的实用方法。下面以感性负载为例阐述负载参数的确定方法。

对于无差拍控制逆变器而言,由于输出端加了一个二阶 LC 低通滤波器,负载又是和滤波器电容并联的,因此负载电压和电容电压是相等的,另外根据基尔霍夫电流定律,负载电流也可以用电感电流和电容电压来表示(采样周期 T 必需足够小),即

$$i_{L_1} = i_L - i_C = i_L - C \frac{du_c}{dt} \quad (1)$$

式中： i_L, i_c, u_c 分别为电感电流、电容电流和电容电压(也就是负载电压),如图 1 所示。

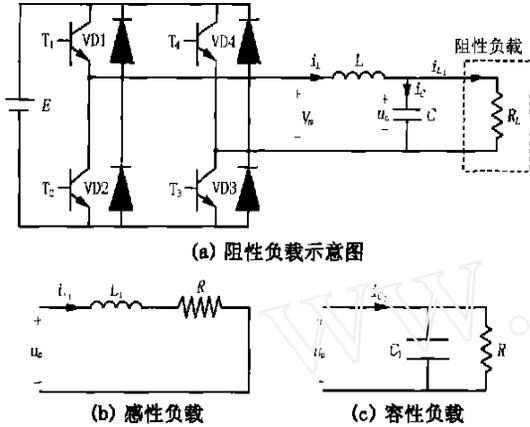


图 1 单相全桥逆变器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase whole bridge inverter

离散化后得到：

$$i_{L_1}(0) = i_L(0) - C \left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0} = i_L(0) - C \frac{u_c(T) - u_c(0)}{T} \quad (2)$$

为了下文书写方便,假设式(2)中 i_{L_1} 的为 i , 负载电压(滤波器电容电压)为 u 。设 i_{k-1}, i_k 和 i_{k+1} 为 3 个相邻采样时刻负载上的电流的计算值,时间间隔为 T, u_{k-1}, u_k 和 u_{k+1} 为滤波器电容上相应时刻的电压。对于感性负载,由图 1(b)可列出电压电流的关系式：

$$L_1 di/dt + Ri = u \quad (3)$$

用相邻采样时刻上的电流电压瞬时值表示则有：

$$L_1 \frac{i_k - i_{k-1}}{T} + i_{k-1}R = u_{k-1} \quad (4)$$

$$L_1 \frac{i_{k+1} - i_k}{T} + i_k R = u_k \quad (5)$$

由式(4)和式(5)得：

$$R = \frac{i_{k+1} - i_k}{i_{k+1}i_{k-1} - i_k^2} u_{k-1} - \frac{i_k - i_{k-1}}{i_{k+1}i_{k-1} - i_k^2} u_k \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{i_{k-1}T}{i_{k+1}i_{k-1} - i_k^2} u_k - \frac{i_k T}{i_{k+1}i_{k-1} - i_k^2} u_{k-1} \quad (7)$$

结合式(2)、(6)、(7)可知,若测得电感电流以及电容电压的瞬时值,就能确定负载的参数。同理,可推得容性负载参数估算公式：

$$C_1 = \frac{(i_{k+1}u_k - i_k u_{k+1})T}{u_{k+1}u_{k-1} - u_k^2} \quad (8)$$

$$R = \frac{u_{k+1}(u_k - u_{k-1}) - u_k(u_{k+1} - u_k)}{i_{k+1}(u_k - u_{k-1}) - i_k(u_{k+1} - u_k)} \quad (9)$$

阻性负载参数估算公式：

$$R = u_k / i_k \quad (10)$$

由式(6)~(10)可知,我们可以在 3 个无差拍控制采样周期内估算出负载参数的值。

2 负载性质的识别

式(6)~(10)是各种负载参数的估算公式,在实际应用时,最终选择那一组公式来确定负载参数,进而确定控制方程及其系数是由负载性质决定的。因此,首先必须确定负载的性质。通常,判断负载是感性、容性还是纯阻性,都要通过检测流过负载的电压电流相位差才能决定,而且最少需要 1/4 个信号周期才能判别出来,本文针对无差拍控制逆变器的特点,利用无差拍控制逆变器的控制方程,结合上文介绍的负载参数估算方法,提出了一种软件判断方法,它既可缩短负载性质识别所需时间,又无需设计硬件电路。当负载变化后,最长不超过 3 个无差拍采样周期的时间,就能检测出新的负载性质,并且估算出负载参数。并用新的负载参数重新修改控制方程的系数达到精确控制的目的。由于本文中负载性质的识别方法与无差拍控制逆变器的控制方程有关,因此首先给出本文的无差拍控制方程。

结合图 1(a)、(b),对于感性负载来说,有以下电路方程：

$$L di_L/dt + u_c = V_m \quad (11)$$

$$i_L = i_{L_1} + C du_c/dt \quad (12)$$

$$u_c = i_{L_1}R + L_1 di_{L_1}/dt \quad (13)$$

将式(11)、(12)、(13)进行拉氏变换得：

$$LSi_L - Li_L(0) + U_c = U_m \quad (14)$$

$$I_L = I_{L_1} + CSU_c - Cu_c(0) \quad (15)$$

$$U_c = RI_{L_1} + L_1 SI_{L_1} - L_1 i_{L_1}(0) \quad (16)$$

式中： I_L, I_{L_1}, U_c 分别为 i_L, i_{L_1}, u_c 经过拉氏变换后在复频域中对应的量,设采样周期内方波脉冲 U_m 的拉氏变换为 U_m ,则 U_m 的近似式为：

$$U_m = E T - ET TS/2 \quad (17)$$

从式(14)、(15)、(16)中消去 I_L 和 I_{L_1} 得：

$$\left[1 + \frac{R}{L_1} S^{-1} + \left(\frac{1}{LC} + \frac{1}{L_1 C} \right) S^{-2} + \frac{R}{LL_1 C} S^{-3} \right] U_c = \left[\frac{R}{LL_1 C} S^{-3} + \frac{1}{LC} S^{-2} \right] U_m + u_c(0) S^{-1} +$$

$$\left[\frac{Ru_c(0)}{L_1} + \frac{i_L(0) - i_{L_1}(0)}{C} \right] S^{-2} + \frac{Ri_L(0)}{L_1 C} S^{-2} \quad (18)$$

U_c 用泰勒级数展开后, 取到三次项, 再进行拉氏反变换, 再把式 (2) 代入, 就得到感性负载的无差拍控制方程为:

$$u_c(T) = \left[1 - \frac{TL_1}{LRC} - \frac{T}{RC} \right] u_c(0) + \left[\frac{T}{C} - \frac{2L_1}{RC} + \frac{2L_1}{LR} \right] i_1(0) \pm \frac{2L_1}{TR} \left[\frac{ET}{2LC} + \frac{ET^3}{4L^2 C^2} + \frac{ET^3}{2LL_1 C^2} \right] T \quad (19)$$

式中: T 为采样周期; T 为采样周期内脉冲的宽度; L 、 C 分别为滤波器电感和电容的值; E 为直流侧电压; L_1 为感性负载的等值电感; R 为感性负载的等值电阻。

从式 (19) 中可以看出, 只需要检测当前采样时刻的电容电压、电感电流值, 结合当前采样周期内的逆变器输出脉冲宽度和极性, 就能计算出采样周期末尾时刻的电容电压的值。与文献 [6] 的方法比较, 省略了对负载电流的检测环节, 减小了系统硬件结构, 降低了成本, 而且能够保证控制系统的精度。同理, 可推导出阻性负载和容性负载的新的无差拍控制方程。

阻性负载无差拍控制方程:

$$u_c(T) = \left[1 - \frac{T}{RC} + \frac{T^2}{2R^2 C^2} - \frac{T^2}{2LC} \right] u_c(0) + \left[\frac{T}{C} - \frac{T^2}{2RC^2} \right] i_1(0) \pm \left[\frac{ET}{2LC} + \frac{ET^3}{4L^2 C^2} - \frac{ET^3}{4LR^2 C^3} \right] T \quad (20)$$

容性负载的无差拍控制方程为:

$$u_c(T) = \left[1 - \frac{T}{R(C+C_1)} + \frac{T^2}{2R^2(C+C_1)^2} - \frac{T^2}{2L(C+C_1)} \right] u_c(0) + \left[\frac{T}{C+C_1} - \frac{T^2}{2R(C+C_1)^2} \right] i_1(0) \pm \left[\frac{ET}{2LC} + \frac{ET^3}{4L^2(C+C_1)^2} - \frac{ET^3}{4LR^2(C+C_1)^3} \right] T \quad (21)$$

式中: C_1 为容性负载的电容分量。

用式 (3) ~ (10) 计算得到的参数作为负载的估算参数, 将式 (19) ~ (21) 作为判别估算负载参数有效性的判别式, 用采样周期起始时刻的电容电压、电感电流、输出脉冲宽度与极性以及负载的估算参数, 按负载的性质分别代入式 (19) ~ (21), 这样得到采样周期末尾时刻的电容电压 (负载电压) 的 3 个计算值, 这 3 个计算值中与实际负载电压最接近的那个计算值所对应的负载估算参数可以认为是最符合实

际情况的负载参数, 与此同时, 负载的性质也就判明了, 这就是本文采用的负载性质识别的方法。

3 仿真结果

对图 1 所示电路, 根据开关的状态分段列出电路微分方程, 离散化后利用计算机对电路方程进行求解, 就能获得各状态变量的数值模拟结果。下面给出一例感性负载时计算机模拟得到的结果。设图中各电路参数为: $E = 400 \text{ V}$, $L = 50 \mu\text{H}$, $C = 30 \mu\text{F}$ 无差拍控制正弦输出参考电压的频率为 50 Hz, 幅值为 300 V, 采样频率为 10 kHz。

表 1 给出了逆变器在取样周期内进行负载性质判别及参数估算的数值模拟结果。从表中可以看出, 在各个采样周期内, 负载参数估算值与实际值非常接近 (其误差大小与采样频率有关, 主要是由于采用了对求导运算一个差分近似), 负载性质判断准确, 没有将感性负载误判断成纯阻性负载或者容性负载, 说明了这种负载性质判别方法的是切实可行的。

表 1 感性负载 (实际标称值 $R = 4.1 \Omega$, $L = 1.2 \times 10^{-6} \mu\text{H}$) 估算结果

Tab. 1 Estimation results of inductive load

采样周期	R_{ESL}/Ω	$L_{ESL}/\mu\text{H}$
1	4.099 997 574 951 22	1.199 930 753 966 75
2	4.099 995 051 030 23	1.200 435 192 490 36
3	4.099 996 774 382 59	1.199 917 742 273 14
4	4.099 994 860 596 54	1.200 685 458 306 25
5	4.099 997 274 150 26	1.199 472 057 072 59
6	4.099 994 369 141 75	1.201 230 318 405 99
7	4.099 997 754 362 87	1.198 830 574 766 08
8	4.099 993 902 045 83	1.201 965 910 222 62
9	4.099 998 206 470 26	1.198 003 806 136 83
10	4.099 993 466 675 09	1.202 880 635 722 83

表 1 中 R_{ESL} 、 L_{ESL} 分别为感性负载电阻、电感的估算值。

图 2 给出了在没有外部扰动的情况下, 利用负载估算参数和负载标定参数进行无差拍控制的输出波形比较, 结果相差很小。对图 2 中的两个电压波形进行频谱分析可知, 利用负载估算参数进行无差拍控制输出电压的谐波失真为 2.76%, 用实际负载标定参数时的输出电压谐波失真为 2.77%。

图 3 给出了在有外部扰动的情况下, 利用负载估算参数和负载实际参数进行无差拍控制的输出波形比较, 结果相差也很小。

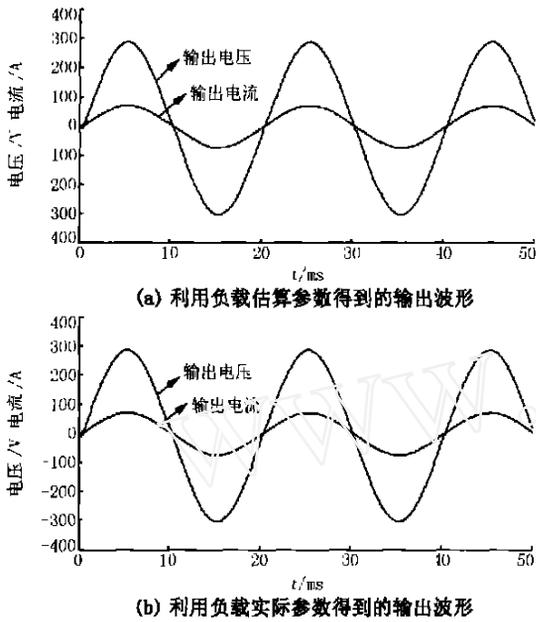


图2 稳态情况下输出电压电流波形
Fig.2 Output voltage and current waveforms in the case of steady state

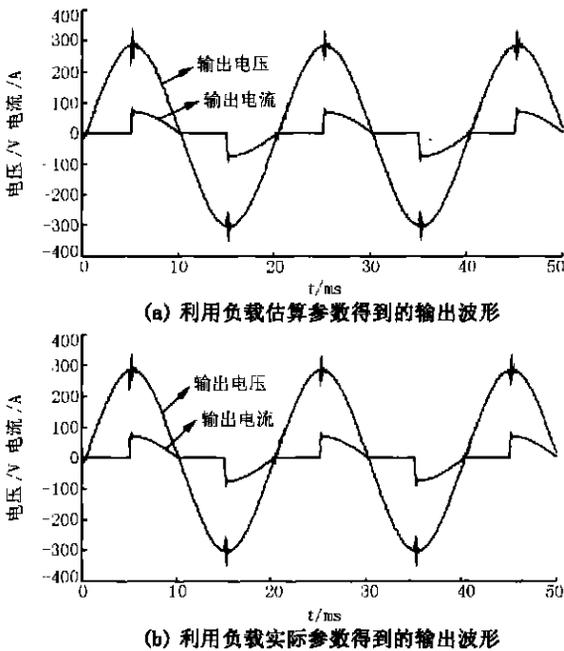


图3 存在外部扰动时的无差拍控制逆变器输出电压电流波形
Fig.3 Output voltage and current waveforms of deadbeat controlled inverter with outside disturbance

4 结论

本文提出了一种无差拍控制逆变器负载性质判别与参数估算的新方法,在一定程度上解决了无差

拍控制逆变器对电路参数变化的敏感的缺点。本文提出的这种方法的优点在于:无需另行设计判别负载性质的专门电路;无需检测负载上的电流就能估算出负载参数,减少了系统的硬件成本;可进行快速估算与判别,负载的变化可在2~3个取样周期内得到反映。

参考文献:

- [1] Hua C C. Two-level Switching Pattern Deadbeat DSP Controlled PWM Inverter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997, 10(3):310-317.
- [2] Kawamura A, Chuarayapratip R, Haneyoshi T. Deadbeat Control of PWM Inverter with Modified Pulse Patterns for Uninterruptible Power Supply[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 35(2):295-300.
- [3] Gokhale K P, Kawamura A, Hoft R G. Deadbeat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis[J]. IEEE Trans on Ind Appl, 1987, IA-23(5):901-909.
- [4] 陈建章,严仰光 (CHEN Jian-zhang, YAN Yang-guang). 不同性质下无差拍控制 PWM 逆变器的研究 (Research on the Deadbeat Controlled PWM Inverter Under Loads of Different Properties) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 1996, (3):38-42.
- [5] 高军,姜桂宾,杨旭,等 (GAO Jun, JIANG Gui-bin, YANG Xu, et al). 系统辨识在 UPS 逆变器无差拍控制中的应用 (System Identification Used in the Deadbeat Controlled UPS Inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2002, (4):5-7.
- [6] 陈建章,严仰光 (CHEN Jian-zhang, YAN Yang-guang). 无差拍控制逆变器负载性质识别及参数估算方法 (A Method for Recognizing Load Properties and Estimating Its Parameters for Deadbeat Controlled Inverter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 1997, (2):61-63.

收稿日期: 2004-03-30; 修回日期: 2004-04-26

作者简介:

罗光富(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用; E-mail: tomy-1gf@tom.com

王建赓(1972-),男,博士,副教授,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用;

纪延超(1962-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用。

(下转第 31 页 continued on page 31)

闭锁值的方法,现场试验验证了分析结果的正确性。据此选用的同期闭锁装置和过流保护已在杭州电网 110 kV 通惠变现场投入运行,合环操作无需停电,提高了供电可靠性。而且本文的推论也为地区电网调度人员降低合环潮流提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 张伯明,陈寿孙 (ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun). 高等电力网络分析 (Advanced Power System Network Analysis) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1995.
- [2] Burnett R O, Butts M M, et al. Synchronized Phasor Measurement of a Power System Event [J]. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9(3): 1643-1649.
- [3] 卢志刚,赫玉山,等 (LU Zhi-gang, HE Yu-shan, et al). 电力系统实时相角监控系统研究 (Research of Phase Angle Monitoring Control System in Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1997, 21

(9): 17-19.

- [4] 陈珩 (CHEN Heng). 电力系统稳态分析 (Steady State Analysis of Electrical Power System) [M]. 北京:水利电力出版社 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1985.
- [5] 东北电业管理局调度通信中心 (Northeast Electric Power Bureau Dispatching Center). 电力系统运行操作和计算 (Operation and Calculation of Power System) [M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社 (Shenyang: Liaoning Science and Technology Press), 1996.

收稿日期: 2004-03-24; 修回日期: 2004-05-13

作者简介:

夏翔 (1974 -), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力调度及运行工作; xia-xiang@hz.zpepc.com.cn

周昱甬 (1970 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力调度与运行管理工作;

邱伟成 (1960 -), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力调度与运行管理工作。

Power flow analysis of closing interconnection switches for weakly meshed networks in regional grid

XIA Xiang, ZHOU Yu-yong, QIU Wei-cheng

(Hangzhou Electric Power Bureau, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Since the 220 kV power grid of Zhejiang Province gets zonalized, the different impedance and power flow on the 110 kV distribution line cause problems. That the large phase angle difference across the sectionizer, which connect two different 220 kV zones, leads to large loop current when the sectionizer is switch on. The equipment overload and even the switch trip may occur. Currently the method of "opening breaker before connection" is applied for such kind of operation in Hangzhou grid. A short time outage is required in the process, which decreases the supply continuity. In this paper, the formula of sectionizer current is concluded from power flow analysis by establishing equivalent system impedance based on the radiant characteristic of regional grid. In addition, sychronized lock equipment is suggested to avoid overload. This equipment demonstrates good performance of 110 kV network connection without short time outage incurring. Further application could be developed for larger zone connection and loop current reduction.

Key words: sectionizer current; equivalent system impedance; sychronized lock equipment

(上接第 14 页 continued from page 14)

Load properties on-line recognition and parameter estimation based on deadbeat control inverter

LUO Guang-fu, WANG Jiar-ze, JI Yan-chao

(Department of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The deadbeat control is based on precise mathematics model of the object. The disadvantage of this control method is that the parameters of the controller depend on the parameters of the control object. When the parameters of the object change, it demands the parameters of the controller changing, or it will cause a large control error. This paper presents a new method for load properties online recognition and parameters estimation according to the characteristic of the deadbeat control inverter. This method solves the problem that the controller parameters do not match with the control object parameters which exists in the traditional deadbeat control inverter. The validity and feasibility of this proposed method is verified by simulations.

Key words: deadbeat control; load properties recognition; parameter estimation