

新能源发电并网系统的控制策略

薛媛, 陈哲照, 王涛, 翟莎, 王喜刚

(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 滞环电流控制方法具有动态响应速度快和电路跟踪性能好的优点, 该方法获得了广泛的应用和发展。从降低开关频率和改善系统输入电流谐波总畸变率 THD (Total Harmonic Distortion) 的角度出发, 研究和设计了一种具有倍频效果的改进三态正弦电流滞环宽度控制方法, 可以有效地减少开关管功率损耗, 降低并网逆变器系统的 THD。利用 Matlab/Simulink 仿真进行分析, 与传统的固定滞环电流控制方法相比较, 在相同电路参数和控制参数条件下, 应用改进三态正弦电流滞环宽度控制方法, 减小了功率开关管损耗, 降低了脉宽调制 (PWM) 逆变器系统的 THD, 有利于提高并网系统的稳定性和运行效率。

关键词: 滞环电流控制; 开关频率; 谐波总畸变率; 仿真; 脉宽调制

Control strategy of grid-connected power generation system on renewable energy

XUE Yuan, CHEN Zhe-zhao, WANG Tao, ZHAI Sha, WANG Xi-gang
(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A hysteresis current control method which has a high speed of dynamic response and superior capability in circuit tracing is presented in this paper. It is employed and developed extensively. The novel three-level sine current hysteresis width control, which doubles frequency, reduces switching frequency and ameliorates total harmonic distortion of system current, is researched and designed. The comparison of three-level sine current hysteresis width control with traditional fixed hysteresis current control in the switching frequency, total current harmonic distortion is complemented, at the same condition of circuit parameter and control parameter. The Matlab/Simulink simulation results show that three-level sine current hysteresis width control can reduce the switching-loss of the power devices and pulse-width modulation inverter system, which is helpful to improve the stabilization and efficiency of grid-connected operating.

Key words: hysteresis current control; switching frequency; total harmonic distortion; simulation; PWM

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)13-0011-04

0 引言

随着能源形势日益紧张, 常规化石能源供不应求和环境容量的承载压力, 能源短缺问题早已日渐突出, 开发太阳能、风能等新能源已刻不容缓。作为在新能源发电并网系统中的关键环节, 逆变器输出电流控制技术已经受到越来越多的关注^[1~4]。目前比较常用的电流控制方式有 SPWM 电流控制^[5~9], 滞环电流控制^[10~14], 空间矢量控制^[15,16]。滞环电流控制是一种闭环电流跟踪控制方法, 它具有动态响应速度快和电路结构简单的特点, 因此获得的广泛的应用和发展。本文针对并网 PWM 逆变器运行的特点, 从固定滞环电流控制方法出发, 提出了一种改进三态正弦电流滞环宽度控制方法。和

固定滞环电流控制方法相比, 在相同开关管频率下, 该方法可以明显地提高输出电压频率, 从而降低开关损耗; 同时该方法滞环宽度是按基波同频的正弦规律变化, 使逆变器输出并网电流脉动限定在较小的范围以内, 在电流过零点附近尤其明显, 从而降低并网电流的谐波总畸变率, 改善了系统的性能。本文对该方法进行了深入的研究, 并给出仿真结果, 证实了在并网电流波形质量和效率方面都优于固定滞环电流控制。

1 传统滞环电流控制原理

如图 1 所示为单相光伏并网原理图, 直流侧 DC 可为太阳能或风能等分布式新能源, 交流侧输出电流 i_L 经滤波电感滤波后并入公共交流电网

(U_{net}), 由于公共交流电网电压和频率稳定, 因此, 只要控制输出并网电流 i_L 和电网电压 U_{net} 同相位就能达到控制并网输出功率因数为 1 的目的。

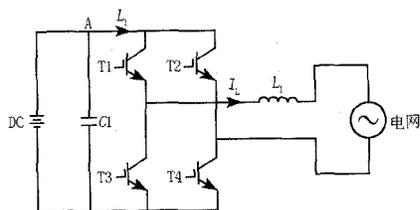


图 1 单相光伏并网原理图

Fig.1 The principle of grid-connected single-phase inverter

如图 2 所示, 与电网电压同步的指定电流:

$$i^* = I_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$\text{滞环上限: } i_1 = i^* + h, \quad (h \text{ 为滞环半宽}) \quad (2)$$

$$\text{滞环下限: } i_2 = i^* - h \quad (3)$$

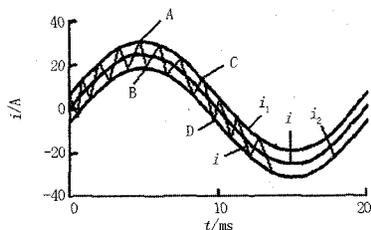


图 2 固定滞环电流宽度控制原理图

Fig.2 The principle of fixed band hysteresis current control

将指令电流 i^* 和实际送入电网的电流 i 相比较, 把差 $|i^* - i|$ 送入固定的滞环比较器, 当 $|i^* - i| > h$ 时改变开关状态 (其中: h 是半滞环宽度)。当 i 为正时, 假设以图 1 所示电流 i 方向为参考, 当 $T_1、T_4$ 导通时, $U_{AB} = U_d$, 电压 $U_{dc} - U_{net}$ 加在电感 L 上, 电流 i 增加, 直到 $i - i^* > h$ 时改变开关状态, 使 $T_2、T_3$ 导通, $U_{AB} = -U_d$, 此时加在电感 L 上的电压是 $-U_{dc} - U_{net}$, 流过 L 的电流减小, 直到 $i^* - i < -h$ 时, 开关状态再次改变, 输出电压只有 $\pm U_{dc}$ 两种状态。如此反复, 迫使电感电流跟踪参考电流而变, 使实际电流实时地跟踪指令电流, 固定滞环电流控制开关逻辑图如图 3 所示, 其中, $T_1、T_2、T_3、T_4$ 的波形即为驱动电路发出的触发脉冲序列。

2 改进正弦电流滞环宽度控制原理

固定滞环宽度控制在图 2 中的滞环宽度是

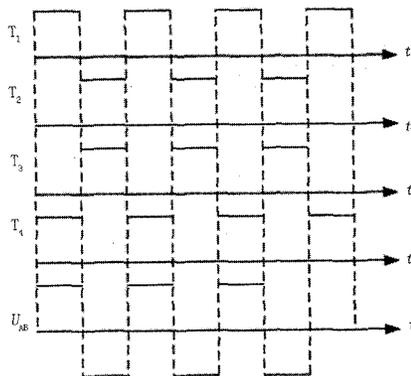


图 3 固定滞环电流控制开关逻辑图

Fig.3 The logic of switching singles for fixed band hysteresis current control

一个定值 $2h$, 当输出并网电流在在峰值附近 A、B 两点时, 其差值约为 $2h$; 而在并网电流过零附近 C、D 两点时, 其差值要大于 $2h$ 得多, 因此, 在并网电流经过零点附近时, 提高了滞环宽度, 增加了并网电流的谐波。而改进正弦滞环宽度控制在图 4 中的滞环宽度则是一个变化量 $2h \sin(\omega t)$, 在并网电流过零时附近, 由于参考电流也过零, 因此, 其值要小于参考电流峰值 $2h$, 所以, 减少了并网电流的谐波。其数学表达式如下:

$$\text{指令电流: } i^* = I_m \sin(\omega t) \quad (4)$$

滞环上限:

$$i_1 = (I_m + h) \sin(\omega t) = i^* + h \sin(\omega t) \quad (5)$$

滞环下限:

$$i_2 = (I_m - h) \sin(\omega t) = i^* - h \sin(\omega t) \quad (6)$$

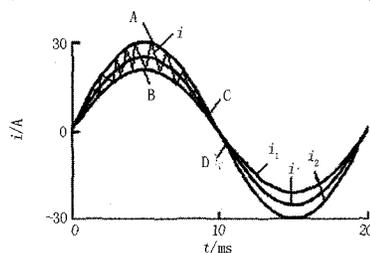


图 4 改进正弦电流滞环宽度控制原理图

Fig.4 The principle of three-level hysteresis-band sine current control

当参考电流处于正半周期时, 将参考电流与输出反馈电流的误差电流处于正半周期时与滞环阈值 $h \sin \omega t$ 做比较, 当输出误差超过滞环的上阈值时, 开关管 $T_1、T_3$ 或 $T_2、T_4$ 导通, $U_{AB} = 0$, 电感电流下降, 使得误差减小, 当误差低于滞环的下阈值时,

开关管 T_1 、 T_4 导通, $U_{AB} = U_d$, 电感电流上升, 使误差减小; 同样当输出电流处于负半周时, 输出误差超过滞环的上阈值, 开关管 T_2 、 T_3 导通, $U_{AB} = -U_{dc}$, 电感电流下降, 使误差减小, 当误差低于滞环的下阈值时, 开关管 T_1 、 T_3 或 T_2 、 T_4 导通, $U_{AB} = 0$, 电感电流上升, 使得误差减小, 因此, 输出电压有 $\pm U_{dc}$ 和 0 三种状态。开关管逻辑如图 5 所示, 开关管的 1 个开关周期中, 输出电压 U_{AB} 已经历了 2 个工作循环, 可实现倍频的功能。同理可得正弦参考电流处于负半周期时的触发脉冲序列。

在图 6 系统仿真框图子系统 (Subsystem) 中, 引入正弦参考电流, 当参考电流处于正半周期时, 误差电流与 $\pm h \sin \omega t$ 相比较, 当大于上阈值而小于下阈值时导通称为 a 电流, 相反则称为 b 电流。屏蔽掉 b 电流的奇数脉冲可得 T_2 的触发脉冲, 屏蔽掉 b 电流的奇数脉冲与 a 电流取或可得 T_1 的触发脉冲; 屏蔽掉 b 电流的偶数脉冲可得 T_3 的触发脉冲, 屏蔽掉 b 电流的偶数脉冲与 a 电流取或可得 T_4 的触发脉冲, 如图 5 改进正弦电流滞环控制开关逻辑图所示, 其中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 的波形即为驱动电路控制发出的触发脉冲序列。同理可得正弦参考电流处于负半周期时的触发脉冲序列。两种滞环电流控制的滞环阈值只有在指令电流的经过峰值或谷值时才相同, 在其它时刻并不相等。

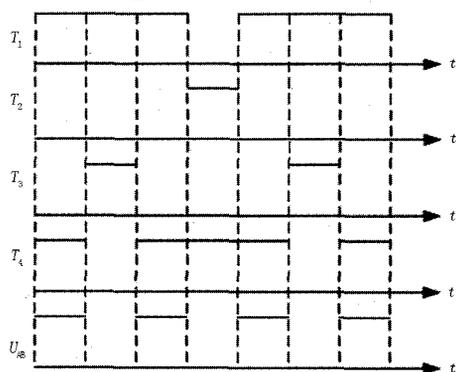
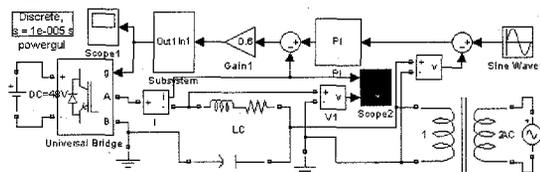


图 5 改进正弦电流滞环控制开关逻辑图
Fig.5 The logic of switching signals for three-level hysteresis-band sine current control

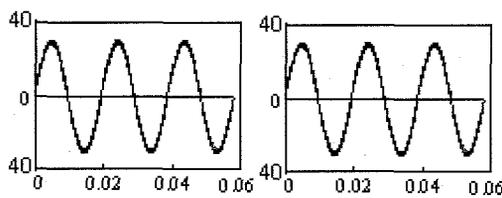
3 仿真与分析

利用 Matlab/Simulink 分别对传统滞环电流控制和改进滞环电流控制进行了单相逆变器并网系统的仿真和分析。仿真参数如下: 直流母线电压为 45 V, 输出交流并网电流峰值 32 A, 频率 50 Hz, 滤波电感 0.5 mH, 经变压器升压后并网, 系统仿真框图如图 6 (a) 所示, 控制系统采用双闭环调节构成

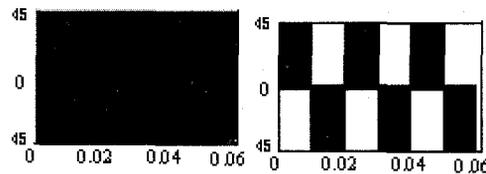
控制电路, 外环为电压环, 通过 PI 调节产生内环的主参考电流; 内环为电流调节。对于同一系统中, 在相同的电路参数和控制参数情况下, 图 6 (b) 分别是固定滞环电流控制和改进电流正弦电流控制的输入系统的电流波形。图 (c) 分别为逆变器输出的电压波形, 可以得到固定滞环电流控制输出电压为 ± 45 V 两种状态, 而改进正弦电流控制输出电压为 ± 45 V 和 0 三种状态。图 (d) 为功率开关管的触发脉冲序列, 对局部放大, 可以看出改进正弦电流控制较固定滞环电流控制触发脉冲序列明显降低, 在同相触发脉冲序列的情况下, 输出电压可起到倍频的作用, 可以降低功率开关管的损耗。图 (e) 是对两种输入系统的电流波形进行快速傅立叶变换计算得到的 THD, 采用固定滞环电流控制方法时, 输入系统电流 THD 为 3.01%, 而采用改进正弦电流滞环控制方法时, 输入系统电流 THD 仅为 1.72%。如果仅采用改进三态电流控制, 其功率开关的频率理论上是传统滞环电流控制的 1/4, 由于采用正弦滞环环宽控制, 尤其是有参考电流过零点附近降低了滞环宽度, 增加了功率开关管的频率, 但减少了并网电流谐波。所以, 不管是在功率开关管方面还是在减少谐波方面, 改进电流滞环控制都具有明显的优势。



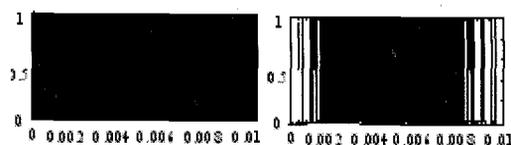
(a) 系统仿真框图



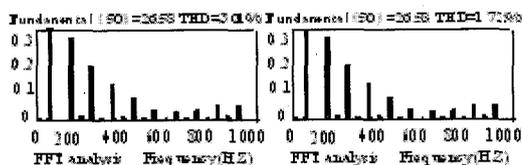
(b) 输入系统电流波形



(c) 逆变器输出电压波形



(d) 功率开关管触发脉冲序列



(e) 输入系统电流 THD

图 6 仿真波形

Fig.6 The simulation waveforms

4 结论

通过本文设计的改进正弦电流滞环宽度控制方法与固定滞环电流控制方法相比较,在相同电路参数和控制参数条件下可以得出,前者具有倍频控制效果,可以减少功率开关管的损耗,提高系统的稳定性;在降低输出系统电流谐波方面,前者也明显优于后者,有利于提高系统的稳定性和运行效率。

参考文献

- [1] 徐海荣,钟史明.充分利用我国太阳能资源开发太阳能光伏产业[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2006,2(4):299-344.
XU Hai-rong, ZHONG Shi-ming. Make Full Use of Our Country's Solar Energy Resource, Develop Solar Energy Photovoltaic Industry[J]. Journal of Shenyang Science, 2006, 28(4): 299-344.
- [2] WEN Li-zi. Vast utilization of Solar power is not a Dream [J]. China Territory Today, 2005, (1-2): 59.
- [3] TANG Ye-hua, XIE Jian. Status and Expectation of Photovoltaic Technology[J]. Renewable Energy, 2005, (3): 68-69.
- [4] 张伯泉,杨宜民.风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势[J].中国电力,2006,39(6):65-69.
ZHANG Bo-quan, YANG Yi-min. Status and Trend of Wind/photovoltaic Power Development[J]. Electric Power, 2006, 39(6): 65-69.
- [5] Macdonald D, Cuevas A. Understanding Carrier Trapping in Multicrystalline Silicon[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 65: 509-516.
- [6] Hudson R M, Behnke M R, West R, et al. Design Considerations for Three-phase Grid Connected Photovoltaic Inverters Photovoltaic Specialists Conference[A]. In: Conference Record of the Twenty-Ninth[C]. 2002. 1396-1401.
- [7] Shannon A. A 240VAC Unity Power Factor Grid Connected Rectifier/inverter Utilizing the Three Phase Motor Drive[D]. Technology and Electrical Engineering University of Queensland, 2002.
- [8] 王学华,阮新波.SPWM 控制单相三电平逆变器[J].中国电机工程学报,2005,25(1):73-76.
WANG Xue-hua, RUAN Xin-bo. SPWM Control Single-phase Three-level Inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 73-76.
- [9] 李达义,陈乔夫.三角波比较电流控制研究[J].通信电源技术,2006,23(4):1-4.
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu. Research on Triangle Wave Comparison Current Control[J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(4): 1-4.
- [10] 王章权,张超,何湘宁.瞬时电流控制策略在光伏并网发电系统中的应用[J].电气应用,2007,26(4):58-60.
WANG Zhang-quan, ZHANG Chao, HE Xiang-ning. The Control Strategies of Instantaneous Current on the PV Grid-connected Generation System[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(4): 58-60.
- [11] Kazmierkowski M P, Malesani L. Current Control Techniques for Three-phase Voltage-Bus PWM Converters: a Survey[J]. IEEE Trans Ind Electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [12] 雷元超,陈春根,陈国呈.滞环比较 PWM 跟踪控制分析[J].水电能源科学,2004,22(1):83-85.
LEI Yuan-chao, CHEN Chun-gen, CHEN Guo-cheng. Analysis of Hysteresis Comparing PWM Tracking Control[J]. Water Resources and Power, 2004, 22(1): 83-85.
- [13] 顾和荣,杨子龙,郭伟扬.并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术研究[J].中国电机工程学报,2006,26(9):108-112.
GU He-rong, YANG Zi-long, WU Wei-yang. Research on Hysteresis Band Current Tracking Control of Grid-connected Inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 108-112.
- [14] 魏克新,张书军,岳有军.可逆变流器正弦滞环宽度控制方法[J].电力自动化设备,2005,25(9):36-38.
WEI Ke-xin, ZHANG Shu-jun, YUE You-jun. Reversible Converter Sinusoidal Band Hysteresis Current Control Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 36-38.
- [15] Okayma H. Large Capacity Large High Performance Three-level GTO Inverter Systems for Steel Main Rolling Mill Drives[A]. In: IEEE Proc IAS Ann Meet Confres[C]. 1996. 174-179.
- [16] 徐立尉,曾岳南,陈林康.电压空间矢量 PWM 技术分析及其计算机仿真[J].计算机仿真,2007,24(3):310-31.
XU Li-wei, ZENG Yue-nan, CHEN Lin-kang. Analysis and Simulink of Space Vector Pulse Width Modulation[J]. Computer Simulation, 2007, 24(3): 310-31.

收稿日期:2007-11-07

作者简介:

薛媛(1969-),女,讲师,研究方向为水利水电自动化;E-mail:xy98@xaut.edu.cn

陈哲熙(1982-),男,硕士研究生,研究方向为交变并网逆变器控制技术;

王涛(1966-),男,副教授,研究方向为太阳能光伏技术。