

基于 CAN 总线的供电系统三相并联逆变器同步控制方法

王江波¹, 杨仁刚^{1*}, 高春风^{1,2}

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对三相并联逆变器系统同步控制中 CAN (controller area network) 总线通信方式存在实时性和准确性随总线负载上升而下降和同步相位调节算法存在谐波频率偏移、波形畸变大等问题, 该文提出了一种基于 CAN 总线通信的基准时间同步方法和基于 PWM (pulse width modulation) 载波周期的相位同步调整算法, 采用动态主从同步控制模式, 所有逆变器单元依次作为主控单元, 按照时间触发和事件触发相结合的方式实时发出包含频率信息的广播同步信号, 所有逆变模块据此确定基准时间并调整输出电压的频率和相位使得同相的逆变器输出电压同频率、同相位, 而不同相的逆变器输出电压相位互差 120°。仿真分析和试验结果表明, 该方法使三相并联逆变器系统输出电压各相之间的相位误差和同相之间相位差均在 1°之内, 可以在无需增加功率器件耐压值和限流值的前提下提高供电系统供电容量。

关键词: 分布式发电, 同步控制, 算法, 逆变器并联, CAN 总线

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.12.023

中图分类号: TM 46

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-12-0179-08

王江波, 杨仁刚, 高春风. 基于 CAN 总线的供电系统三相并联逆变器同步控制方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 179-186.

Wang Jiangbo, Yang Rengang, Gao Chunfeng. Three-phase parallel inverter synchronous control method based on CAN bus in power supply system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(12): 179-186. (in Chinese with English abstract)

0 引言

分布式电源必须通过逆变器控制才能输出符合要求的电能^[1-7]。对于相同容量的三相分布式发电系统, 采取多个单相逆变器并联代替一个三相系统, 可以在扩大系统供电容量时, 不增加功率器件的耐压值和限流值 (降低成本), 从而达到更为经济、可靠、灵活, 更有利于逆变器生产的规范化和产业化发展。因此, 逆变器并联技术成为研究的热点^[8-26]。逆变器并联技术的研究可以分为均流技术^[8-22]和同步控制技术^[14-26]2 个方面。并联逆变器在孤岛或独立运行时, 并联逆变器系统各模块在负荷、间歇性电源功率变化时, 必须实时保持同步和三相对称, 同步控制成了不可或缺的关键环节, 本文的研究主要涉及此环节。

逆变器并联同步控制包括基准时间同步和相位同步调整。基准时间同步可以分为有通信和无通信 2 种模式。无通信模式^[8-12]硬件上简约, 但稳态运行时

频率会偏移额定值。有通信同步控制模式的通信方式主要有同步母线通信^[14-22,24]、载波通信^[23]和 CAN 总线通信^[16,24-26]3 种。CAN 总线通信支持分布式控制和实时控制, 能够实现全网络广播发送信息。CAN 总线一个突出优点是每个节点可以在线连接或断开网络, 可以做到热插拔和多站接收。因此, CAN 总线通信方式较其它方式更合适逆变器并联同步控制。文献[16,24,26]中 CAN 总线仅作为均流时交换控制量使用, 未用于基准时间同步。文献[25]通过 CAN 总线在每个同步周期都向总线发送同步信号, 但通信的实时性和准确性随总线的负载的上升而下降。

目前, 逆变器输出电压相位同步的调整方法主要有 2 种, 一种是在收到同步信号时立即改变相位与参考相位一致; 另一种是收到同步信号时下 1 个周期通过改变频率来调整相位, 再经过 1 个周期才能实现同频、同相^[14-26]。前一种方法可保证频率稳定但会造成较大的电压波形畸变; 后一种方法输出电压波形平滑, 但是相位调整周期的频率偏移大。

为解决 CAN 总线在高通信负载时的实时性差、相位调节频率偏移的问题, 本文提出了一种基于 CAN 总线通信的并联逆变器同步控制方法, 该方法可以让所有逆变器按既定规则依次作为主逆变器, 主逆变器基于自身的时钟周期发送包含频率信息的同步触发帧; 其余逆变器根据 2 个同步触发帧的间隔时间确定

收稿日期: 2013-01-04 修订日期: 2013-05-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA050217)

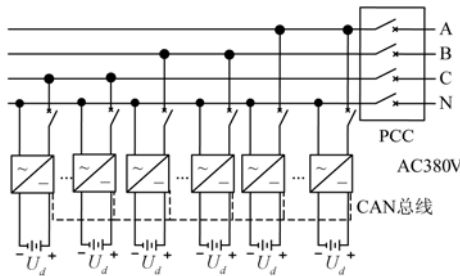
作者简介: 王江波 (1978-), 男, 博士生, 讲师, 研究方向为配电网自动化、电力系统测量、新能源发电。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100086。Email: h00518@163.com

*通信作者: 杨仁刚 (1953-), 男, 教授, 研究方向为农村电力网、农村可再生能源发电工程、电力系统自动化技术。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100086。Email: yrg@cau.edu.cn

输出电压的频率，同时以同步帧作为给定基准相位，计算与自身基准正弦信号的相位差值，在 PWM 的载波周期调节自身正弦基准信号相位与给定相位一致，以提高并联系统中同步控制的精度。

1 三相并联逆变器系统结构

三相并联逆变器系统由 3 组单相并联逆变器组成，3 个并联逆变器组分别接在 A、B、C 相上，每相可并联 1 个或多个单相逆变器，系统结构如图 1 所示。



注： U_d 为直流侧电压，V；PCC 为公共连接点。
Note: U_d is DC side voltage, V; PCC is the point of common coupling.

图 1 三相并联逆变器系统结构图

Fig.1 System structure of three phase paralleled inverters

所有逆变器之间通过 CAN 总线通信实现同步和均流控制。该系统的同步控制必须实时保持单相并联的各逆变器电压严格的同频、同相和同幅，3 个并联逆变器组之间电压同频、同幅、相位互差 120° 。每个单相逆变器内部结构如图 2。逆变器主控芯片采用主频达到 150 MHz 的高速 DSP (digital signal processing) TMS320F28335，该芯片自带 2 通道含 32 个邮箱的增强型 CAN 模块。

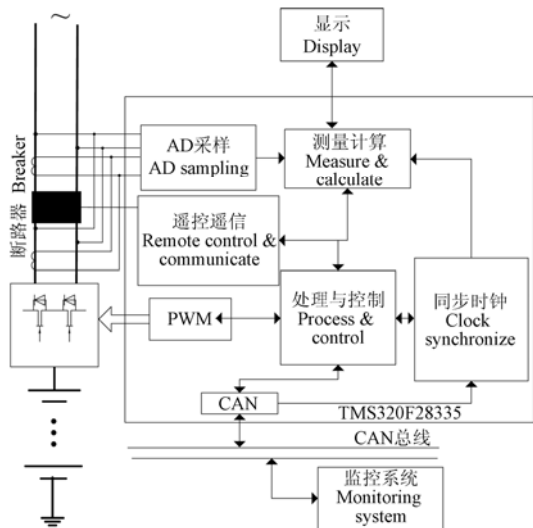


图 2 逆变器控制框图

Fig.2 Control block diagram of inverter

CAN 总线通信按逆变器序列号和相参数确定主逆变器，每个逆变器都可能担当主逆变器。当主逆变器由于故障、退出、异常等原因失效时，按规则另一台逆变器会自动承担主逆变器的任务，既保证了整个

系统不会因为主逆变器的瘫痪而瘫痪，又可以控制总线负载节约网络资源，保证网络的有序性和实时性。

2 同步控制原理

同步控制包括电压幅值、频率和相位 3 个要素，电压幅值的一致性可以通过对所有逆变器电压设置相同输出电压值实现，而频率和相位则须通过 CAN 总线通信实时控制。

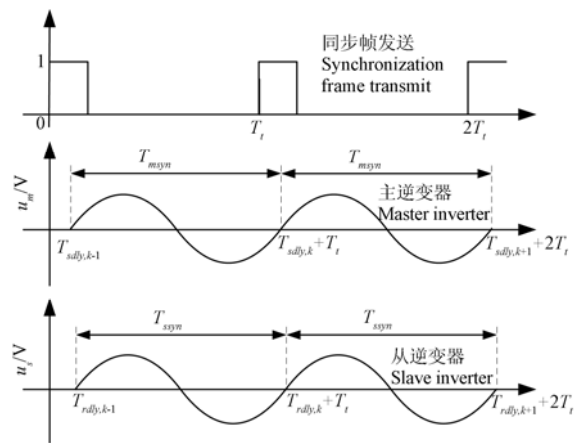
2.1 频率同步方法

主逆变器根据自身时钟周期的定时间隔生成同步信号帧，通过 CAN 总线广播发送给所有从逆变器。从逆变器根据 2 个同步触发帧的间隔时间确定输出电压的频率（周期）。

每个逆变器中都有 2 个时间周期，一个为设定频率对应的时间周期 T_t ，另一个为逆变器 PWM 同步触发周期。当逆变器作为主逆变器时 PWM 同步触发周期记为 T_{msyn} ，作为从逆变器时记为 T_{ssyn} 。当逆变器作为主逆变器时，其设定频率对应的时间周期 T_t 是定时发送同步触发信号帧的周期（称为同步帧周期），作为从逆变器时它的同步帧周期无效。

主逆变变从同步帧周期开始时刻到一个同步帧发送完成之间，还有信息打包、排队、传输和确认过程，这一段延时时间称为发送延时 T_{sdly} ^[27]。每个周期从同步帧周期开始时刻到从逆变器收到同步帧信息并解包完成对应的延时称为接收延时 T_{rdly} 。

由于 CAN 总线通信排队时间和传输时间的随机性，每个周期发送延时和接收延时不尽相同，同步帧传送时序如图 3 所示。



注： u_m 主逆变器电压，V； u_s 从逆变器电压，V； T_t 为设定周期，ms； $T_{sdly, k}$ 和 $T_{sdly, k+1}$ 为第 k 和 $k+1$ 同步帧发送延时，ms； T_{msyn} 为主逆变器同步触发周期，ms； $T_{rdly, k}$ 和 $T_{rdly, k+1}$ 为第 k 和 $k+1$ 同步帧接收延时，ms； T_{ssyn} 为从逆变器同步触发周期，ms。

Note: u_m is main inverter voltage, V; u_s is slave inverter voltage, V; T_t is setting cycle, ms; $T_{sdly, k}$ and $T_{sdly, k+1}$ are the k th and $(k+1)$ th synchronous frame sending delay time, ms; T_{msyn} is master inverter synchronous triggering cycle, ms; $T_{rdly, k}$ and $T_{rdly, k+1}$ are the k th $(k+1)$ th synchronous frame receiving delay time, ms; T_{ssyn} is slave inverter synchronous triggering cycle, ms.

图 3 同步帧传送的时序

Fig.3 Synchronization timing of frame transmission

从图 3 可以看出, 主逆变器第 k 帧发送延时 $T_{sdly,k}$ 加上 PWM 同步触发周期 T_{msyn} 等于同步帧周期 T_t 加下一帧的发送延时 $T_{sdly,k+1}$, 即

$$T_{msyn} + T_{sdly,k} = T_t + T_{sdly,k+1} \quad (1)$$

式中, T_t 为设定周期, ms; $T_{sdly,k}$ 和 $T_{sdly,k+1}$ 为第 k 和 $k+1$ 同步帧发送延时, ms; T_{msyn} 为主逆变器同步触发周期, ms。

同样地, 对于从逆变器有第 k 帧接收延时 $T_{rdly,k}$ 加 PWM 同步触发周期 T_{ssyn} 等于同步帧周期 T_t 加下一帧的接收延时 $T_{rdly,k+1}$,

$$T_{ssyn} + T_{rdly,k} = T_t + T_{rdly,k+1} \quad (2)$$

式中, $T_{rdly,k}$ 和 $T_{rdly,k+1}$ 为第 k 和 $k+1$ 同步帧接收延时, ms; T_{ssyn} 为从逆变器同步触发周期, ms。

由式 (1) 和式 (2) 可知, 主逆变器和从逆变器的同步触发周期分别为

$$T_{msyn} = T_t + T_{sdly,k+1} - T_{sdly,k} \quad (3)$$

$$T_{ssyn} = T_t + T_{rdly,k+1} - T_{rdly,k} \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可知, 主逆变器的 PWM 同步触发周期 T_{msyn} 与从逆变器的同步触发周期 T_{ssyn} 的时差为接收端的解包时间。主频达到 150 MHz 的主控高速 DSP, 信息打包和解包延迟为纳秒级, 可以忽略不计, 因此, 认为 T_{msyn} 与 T_{ssyn} 相等。但是, 如果 CAN 总线负载率高时, 同步帧传送的排队等待延时、传输延时会加长, 并且随机性也增大, 造成相邻各帧的发送延时不等 (接收延时也不等), 使得并联逆变器电源输出频率产生波动。

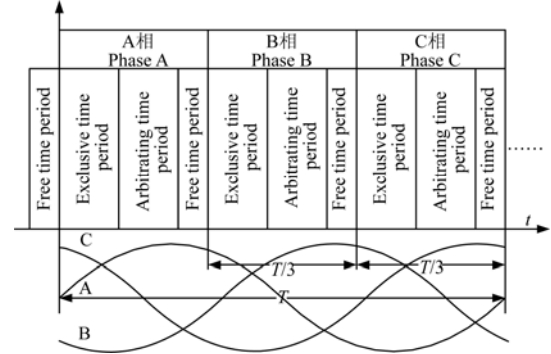
通常, 系统中的 CAN 总线不仅传递同步帧而且还要传递均流控制、实时监控和其他参数信息。因此必须改进 CAN 总线的通讯方式, 以减小同步帧的排队等待延时和传输延时。首先, 选择时间触发机制与事件触发机制相结合的 CAN 协议保证同步帧的实时性和逆变器信息传递过程的多主发送。其次, 通过合理地划分各类信息通信占用总线时段保证同步帧发送和接收时 CAN 总线是空闲的。

以 PWM 同步触发周期 T_{msyn} 作为 CAN 协议中的基本周期, 并按 A、B、C 三相电压的零点将基本周期等分为 3 个区间。每个区间又分为独占时段、仲裁时段和空闲时段 3 个时段。独占时段传送各相的重要信息, 仲裁时段传送其他信息, 空闲时段传送同步帧信息, CAN 基本通信周期时段的划分如图 4 所示。

2.2 相位调节算法

从逆变器以同步帧作为给定基准相位 (与主逆变器同相的逆变器给定基准相位为 0, 不同相的给定基准相位分别为 120° 和 240°), 比较自身基准正弦信号与给定基准相位之间的相位差, 然后调节自身基准信号的相位, 使之与给定相位一致。本文提出了基

于 PWM 载波周期的相位调整方法, 从给定基准相位对应的 0 时刻开始在每一个载波周期的相位值上加一个微小调整量, 并保证相位调整周期的频率不变。



注: T 为正弦电压周期, 即通信周期, ms。

Note: T is cycle of sinusoidal voltage, and also is communication cycle, ms.

图 4 CAN 通讯时间段划分图

Fig 4 Time period divided figure of CAN communication

设相位调节的总点数为 n , PWM 的载波比 N 。为了使相位在每个电压周期内均匀调整, 取 $n=N$, 则每个载波周期的相位调整量为

$$\Delta\varphi = \frac{\varphi_g - \varphi_0}{N} \quad (5)$$

式中, $\Delta\varphi$ 为每个载波周期的相位调整量, rad; φ_0 为 t_i 时刻逆变器自身的正弦信号相位, rad; φ_g 为同步参考相位, rad, $\varphi_g - \varphi_0$ 为需要调节的相位差, rad。

逆变器正弦信号调整后, 在 t_{i+k} ($k=1, 2, \dots, N$) 时刻的相位 (φ_{i+k} , rad) 为

$$\varphi_{i+k} = \varphi_0 + \frac{k \times 2\pi}{N} + k\Delta\varphi \quad (6)$$

当 $k=N$ 时, 将式 (5) 代入式 (6), 可得 t_{i+N} 时刻调整后的相位为

$$\varphi_{i+N} = \varphi_g + 2\pi \quad (7)$$

式 (7) 表明 t_{i+N} 时刻逆变器正弦信号的相位与 φ_g 相同, 即经过 N 个载波周期 (1 个电压同步周期) 逆变器正弦信号与同步基准参考信号同相位。相位调节过程如表 1 和图 5 所示。在第 i 个到第 $i+N$ 个时间段内, 初始相位为 φ_0 , 第 k 个时刻调整前的相位为 $\varphi_0 + k2\pi/N$, 调整后的相位为 $\varphi_0 + 2k\pi/N + k\Delta\varphi$ 。

3 CAN 总线应用层设计

CAN 总线已经对物理层和数据链路层进行了定义, 实际应用中需要进行 CAN 标识符、数据长度、数据内容和通讯方式的定义。合理的 CAN 总线应用层定义能够实现三相并联逆变器系统同步帧的实时准确发送和信息的快速可靠交换。本文同步触发帧采用 CAN 标识符长度、数据内容和长度固定的帧结构和时间触发机制与事件触发机制相结合的通信方式^[28-29]。

主逆变器的动态设定通过动态分配 CAN 标识

符（地址）实现，包括动态地址分配过程和主逆变器轮换过程。

动态地址分配过程如图 6 所示。

表 1 相位调节序列

Table 1 Phase adjustment sequence

序列号 Sequence	时间 Time/ms	调整前相角 Phase angle ahead/rad	调整后相角 Phase angle behind/rad
i	t_i	φ_0	φ_0
...
$i+k$	t_{i+k}	$\varphi_0 + k \frac{2\pi}{N}$	$\varphi_0 + k \frac{2\pi}{N} + k\Delta\varphi$
...
$i+N$	t_{i+N}	$\varphi_0 + 2\pi$	$\varphi_g + 2\pi$

注：相位调节序列共有 $N+1$ 个；首序列号为 i ，末序列号为 $i+N$ ，第 k 个的序列号为 $i+k$ ；时间为 t_{i+k} ，ms；调整前相角为 $\varphi_0+k2\pi/N$ ，rad；调整后相角为 $\varphi_0+2k\pi/N+k\Delta\varphi$ ，rad。

Note: Number of phase adjustment sequence is $N+1$; i is the first, $i+k$ is the k th, and $i+N$ is the last; t_{i+k} is time, ms; phase angle before adjustment is $\varphi_0+k2\pi/N$, rad; phase angle after adjustment is $\varphi_0+2k\pi/N+k\Delta\varphi$, rad.

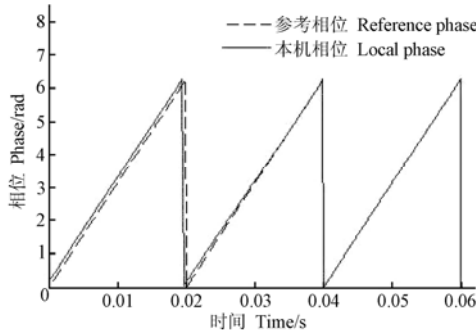


图 5 逆变器相位同步过程

Fig.5 Phase synchronizing process of inverter

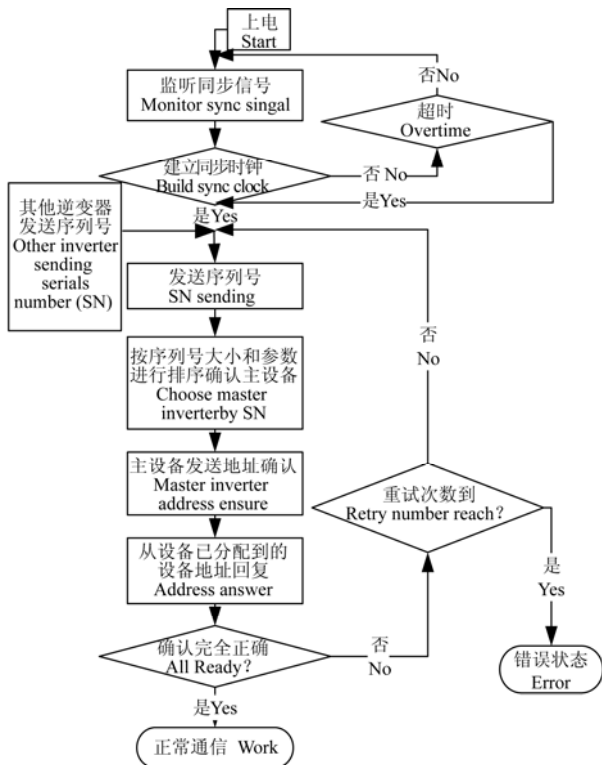


图 6 CAN 通讯自动组网和网络管理流程

Fig.6 Processes of CAN communication adhoc network and network management

动态地址的分配过程在系统上电或有新逆变器加入时启动。所有逆变器收到启动信号后，将自身的“序列号和相参数”发送到总线上，同时也接受其它逆变器发出的“序列号和相参数”，并根据约定规则排队（轮换循环队列）确认 1 台主逆变器。

当主逆变器失效时启动轮换过程。每台逆变器在每个同步时钟周期侦听总线中是否有同步帧信号，如果同步帧信号消失，则由失效主逆变器序列号和轮换队列自动确定新的主逆变器。在按轮换队列应作为主逆变器的逆变器已退出的情况下，同步帧消失时延将超过给定值，此时所有逆变器向总线发出同步帧，由总线仲裁确定新的主逆变器。

4 试验验证

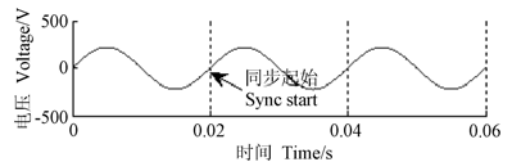
为了验证本文提出的相位调节方法和基于 CAN 总线的三相并联逆变器系统同步控制方法，分别进行了 Matlab 仿真试验和物理试验。

4.1 仿真试验

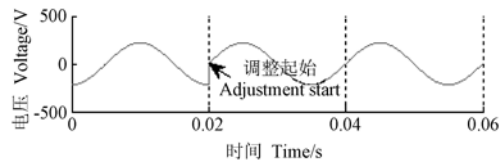
在 Matlab 仿真平台上，对以往相位突变和变频调整的相位同步方法与本文提出的基于 PWM 载波周期的相位同步方法进行幅频特性对比分析。

同步基准参考电压幅值 220 V、频率 50 Hz、初相位 $\varphi_g=0$ ；逆变器电压正弦信号幅值 220 V、频率 50 Hz、初相位 $\varphi_0=-90^\circ$ 。

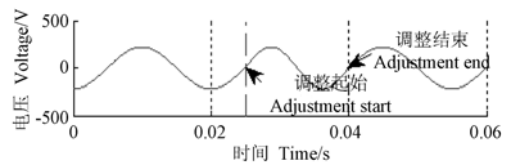
基准参考电压波形和 3 种相位同步方法获得的电压输出波形如图 7 所示，相位调整周期的幅频特性对比如图 8 所示，由图 8 的幅频特性计算电压畸变和频率偏移量，结果见表 2。



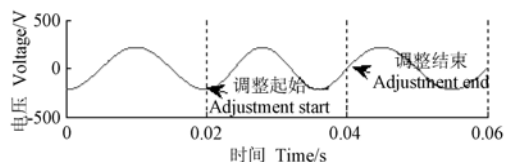
a. 参考电压波形
a. Reference waveform



b. 立即改变相位调节电压波形
b. Immediately change phase adjustment waveform



c. 变频率调节电压波形
c. Variable frequency adjustment waveform



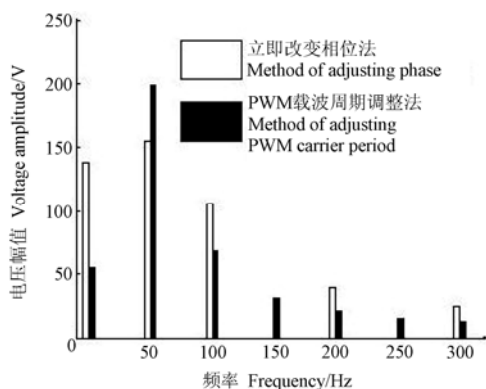
d. 载波周期调节电压波形

d. Carrier period adjustment waveform

注：同步基准参考电压幅值 220 V、频率 50 Hz、初相位 $\phi_g=0$ ；逆变器电压正弦信号的幅值 220 V、频率 50 Hz、初相位 $\phi_0=-90^\circ$ 。下同
 Note: synchronization reference voltage amplitude is 220 V. Frequency is 50 Hz. Initial phase angle ϕ_g is zero. Sinusoidal voltage amplitude of inverter is 220 V. Frequency is 50 Hz. Initial phase angle is -90° . The same below.

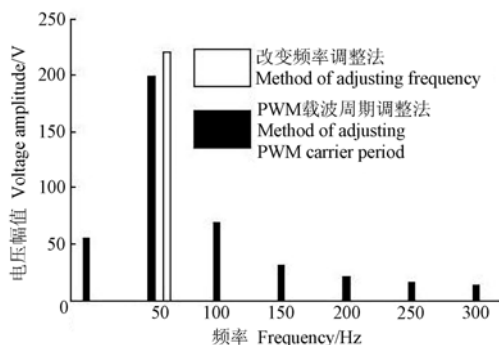
图 7 相位同步过程中 3 种调节方法的电压波形比较

Fig.7 Voltage waveforms comparison of three adjustment methods in phase synchronization process



a. 与立即改变相位调节法对比

a. Compared with immediately change phase adjustment method



b. 与变频率调节法对比

b. Compared with variable frequency adjustment method

图 8 不同相位同步方法调整过程电压幅频特性比较

Fig.8 Amplitude-frequency comparison between different phase synchronization method in phase adjustment process.

表 2 3 种相位同步方法的谐波畸变率和频率偏移

Table 2 THD and FS of three phase synchronization methods

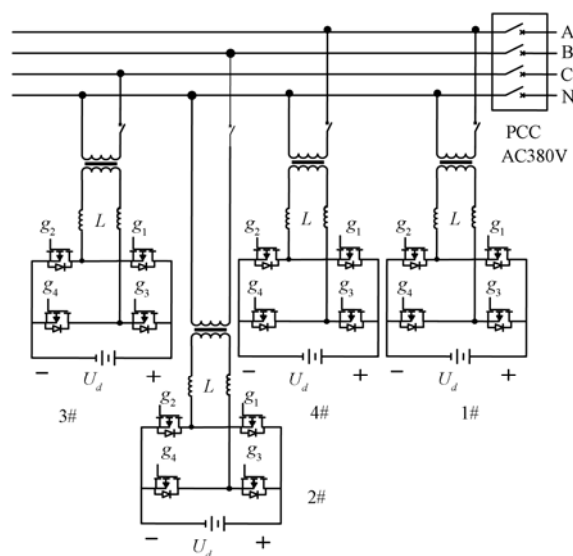
方法 Method	电压畸变率 Total harmonic distortion/%	频率偏移 Frequency shift/Hz
载波周期同步法 PWM carrier period synchronization	8.8	0
立即改变相位调节法 Immediate adjusting phase	26.7	0
变频率调节法 Adjusting frequency	无穷大	16.67

由图 7b 电压波形和图 8a 的幅频特性可以看出，立即改变相位法的基波频率没有偏移，但电压

畸变大，最大值为 26.7%。由图 7c 电压波形和图 8b 可以看出，变频同步法的频率偏移达到 16.67 Hz，由于信号中没有 50Hz 的基波成份，电压畸变率视为无穷大。本文提出的载波周期同步法电压波形畸变为 8.8%，较立即改变相位法减少 18.9%，较变频率调节法无频率偏移。由此可见，本文的方法既能保持相位同步过程中基波频率不变又能保证电压波形没有大的畸变。

4.2 物理试验

试验中为满足单相并联，三相并联的验证目标，同时考虑现有设备条件，本文用 4 台单相逆变器组成三相并联逆变器试验系统，进行独立运行试验，验证本文同步控制方法的有效性，试验系统如图 9 所示。



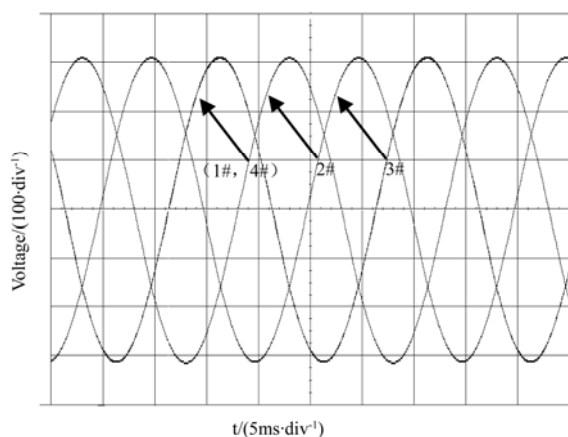
注：1#，2#，3#，4#分别为 4 台逆变器的编号； U_d 为直流侧电压，V； g_1 、 g_2 、 g_3 、 g_4 为开关器件； L 为低压侧滤波电感，mH；PCC 为公共连接点。
 Note: 1#, 2#, 3#, 4# are number of four inverters; U_d is the DC side voltage, V; g_1 - g_4 are switching devices; L is filter inductor on the low voltage side, mH; PCC is the point of common coupling.

图 9 试验系统简图

Fig.9 Test system diagram

图 9 中，1#和 4#单相逆变器组成 A 相逆变电源，2#和 3#逆变器分别作为 B 相和 C 相的逆变电源。逆变器直流电源为 150 Ah、48 V 铅酸蓄电池，即 $U_d=48$ V。单相逆变器额定容量 6 kVA、输出额定电压为 220 V，频率 50 Hz。控制器选用高性能 32 位浮点型 DSP 芯片 TMS320F28335。4 台逆变器的控制器之间通过 CAN 总线互联，CAN 总线波特率采用 125 kbit/s。

试验中，设定逆变器的输出电压为 220 V，频率为 50 Hz，1#、4#逆变器设定为 A 相，2#逆变器设定为 B 相，3#逆变器设定为 C 相。采用安捷伦 MSO7104B 混合信号示波器记录 4 台逆变器输出电压波形如图 10 所示。



注: 相移(1-2): 121°相移(2-3): 120°; 相移(3-1): 120°; 相移(1-4): 0°; 1#, 2#, 3#, 4#分别为4台逆变器的波形编号。

Note: Phase shift(1-2):121°; Phase shift(2-3):120°; Phase shift(3-1):121°; Phase shift(1-4):0°; 1#, 2#, 3#, 4# are number waveforms of four inverters respectively.

图 10 4 台逆变器输出电压波形

Fig.10 Output voltage waveforms of four inverters

由图 10 中示波器数据分析可得, 1#逆变器输出电压波形超前 2#波形 121°、2#电压波形超前 3#波形 120°、3#电压波形超前 1#波形 120°、4#电压波形与 1#波形相位差为 0。试验结果表明, 采用本文提出的同步控制方法可以使三相并联逆变器系统输出电压各相之间的相位误差和同相之间相位差均在 1°之内, 实现了高精度逆变器并联系统同步控制。

5 结论

本文提出了基于 PWM 载波周期的相位调节算法和基于 CAN 总线的逆变器多相并联频率同步控制方法。试验结果表明:

1) 仿真研究表明本文提出的基于载波周期的相位同步方法与立即改变相位调节法和变周期调节法相比, 波形畸变减小了 18.9%, 并且能够保持基波频率为 50 Hz, 没有偏移;

2) 采用本文提出基于 CAN 总线的频率同步控制方法通过物理试验验证了能够使三相并联逆变器系统输出电压相位同步误差均在 1°以内, 符合现场使用要求。

[参 考 文 献]

- [1] Bracale A, Caramia P, Carpinelli G, et al. Site and system indices for power-quality characterization of distribution networks with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1304—1316.
- [2] Kim Jaehyung, Kim Jungu, Ji Younghyok, et al. An islanding detection method for a grid-connected system based on the goertzel algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1049—1055.
- [3] He Jinwei, Li Yunwei, Munir, M S. A Flexible Harmonic Control Approach Through Voltage-Controlled DG-Grid Interfacing Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(1): 444—455.
- [4] Marei M I, Saadany E F, Salama M M A. A novel control algorithm for the DG interface to mitigate power quality problems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1384—1392.
- [5] Marei M I, Saadany E F, Salama M M A. A flexible DG interface based on a new RLS algorithm for power quality improvement[J]. IEEE Systems Journal, 2012 6(1): 68—75.
- [6] 杜海江, 杨明皓, 丑丽丽, 等. 户用风水光直流微电网控制策略与实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 277—282.
Du Haijiang, Yang Minghao, Chou Lili, et al. Research and implementation of home wind-hydro-solar micro-grid control strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 277—282. (in Chinese with English abstract)
- [7] 于蓉蓉, 魏学业, 覃庆努, 等. 基于 Takagi-Sugeno 模糊模型的电流跟踪型光伏并网逆变器[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 240—245.
Yu Rongrong, Wei Xueye, Qin Qingnu, et al. Photovoltaic grid-connected inverter with current tracking control based on Takagi-Sugeno fuzzy model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 240—245. (in Chinese with English abstract)
- [8] Soultanis Nikos L, Papathanasiou Stavros A, Hatziaegyriou Nikos D. A stability algorithm for the dynamic analysis of inverter dominated unbalanced LV microgrids s[J]. IEEE Transactions on Power System, 2007, 22(1): 294—304.
- [9] 郑宏, 史玉立, 孙玉坤, 等. 微电网并网逆变器下垂控制策略的改进[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 191—196.
Zheng Hong, Shi Yuli, Sun Yukun, et al. Improvement of droop control strategy for grid-connected inverters in microgrids[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 191—196. (in Chinese with English abstract)
- [10] Arulampalam A, Barnes M, Engler A, et al. Control of power electronic interfaces in distributed generation Microgrids[J]. International Journal of Electronics, 2004, 91(9): 503—523.

- [11] Brabandere K D, Bolsens B, Keybus J V d, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(4): 1107—1115.
- [12] Mohamed Y A R I, El-Saadany E F. Adaptive decentralized droop controller to preserve power sharing stability of paralleled inverters in distributed generation microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(6): 2806—1816.
- [13] Wu Chunsheng, Liao Hua, YangZilong, et al. Voltage and frequency control of inverters connected in parallel forming a micro-grid[C]// *Power System Technology (POWERCON)*, 2010 International Conference on, 2010: 1—6.
- [14] Yeong Jia Cheng, Sng E K K. A novel communication strategy for decentralized control of paralleled multi-inverter systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2006, 21(1): 148—156.
- [15] Chen Yukai, Wu Yuen, Wu Tsaiifu, et al. ACSS for paralleled multi-inverter systems with DSP-based robust controls[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(3): 1002—1015.
- [16] Cheng Yeongjia, Sng E K K. A novel communication strategy for decentralized control of paralleled multi-inverter systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*[J]. 2006, 21(1): 148—156.
- [17] 何中一, 邢岩, 付大丰, 等. 模数混合分布式逆变器并联控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(4): 113—117.
He Zhongyi, Xing Yan, Fu Dafeng, et al. Distributed hybrid current sharing control for inverters in parallel operation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(4): 113—117. (in Chinese with English abstract)
- [18] 谢孟, 李耀华, 蔡昆, 等. 400Hz 中频单相电压源逆变器的并联运行控制[J]. *电力电子技术*, 2006, 40(4): 35—37, 85.
Xie Meng, Li Yaohua, Cai Kun, et al. Parallel operation control of 400Hz single-phase voltage-source inverter[J]. *Power Electronics*, 2006, 40(4): 35—37, 85. (in Chinese with English abstract)
- [19] Benaifa N, Bierk H, Rahim A H M, et al. Analysis of harmonic reduction for synchronized phase-shifted Parallel PWM inverters with current sharing Reactors[C]// *Electrical Power Conference, IEEE Canada*, 2007: 134—139.
- [20] Roslan A M, Ahmed K H, Finney S J, et al. Improved instantaneous average current-sharing control scheme for parallel-connected inverter considering line impedance impact in microgrid networks[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(3): 702—716.
- [21] Wang Shuang, Ma Yundong, Wang Junqi, et al. A novel power weighted synchronous control method for parallel inverters[C]// *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2010 the 5th IEEE Conference on, 2010: 1384—1388. (in Chinese with English abstract)
- [22] Xu Shungang, Xu Jianping, Tai Qiang. Parallel control strategy of single-phase voltage-source inverter base on synchronous signal bus[C]// *International Conference on Communications, Circuits and Systems*, 2009: 728—731.
- [23] 何中一, 王笑娜, 邢岩. 基于电力线通信的逆变器并联系统同步控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33): 25—29.
He Zhongyi, Wang Xiaona, Xing Yan. Synchronization control for inverters in parallel operation based on power line communication[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(33): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [24] Schellekens J M, Duarte J L, Huisman H, et al. Fast-Shared Current Transient Response in High-Precision Interleaved Inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(11): 3308—3317.
- [25] Zhang Chunjiang, Chen Guitao, Guo Zhongnan, et al. An Alternating-master-slave Parallel Control Research for Single Phase Paralleled Inverters Based on CAN Bus[C]// *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International*, 2006: 1—5.
- [26] Wang Hongliang, Yue Xiumei, Pei Xuejun, et al. The CAN bus monitor system for the three phase inverters[C]// *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2009: 1—4.
- [27] Lian Fengli, Moyne J R, Tilbury D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet[J]. *IEEE Transactions on Control Systems*, 2001, 21(1): 66—83.
- [28] Keating D, McInnes A, Hayes M. Model checking a TTCAN implementation[C]// *2011 IEEE Fourth International Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST)*, 2011: 387—396.
- [29] Hsieh C C, Hsu P L. The CAN-based synchronized structure for multi-axis motion control systems[C]// *2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2005: 1314—1319.

Three-phase parallel inverter synchronous control method based on CAN bus in power supply system

Wang Jiangbo¹, Yang Rengang^{1*}, Gao Chunfeng^{1,2}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Electromechanical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Three phase grid-connected inverters are the key parts for the transfer of dispersed power generation, such as photovoltaic, wind generation, and energy storage systems, and so on. The three-phase system could be replaced with three single phase inverters. In this way, it could enlarge the current capacity easily without using high isolated voltage and large current devices, and it will be more cheap and flexible. However, there would be a significant frequency offset.

With the help of a CAN (Controller Area Network) bus, all the parallel inverters could be the master in the given rules. The master inverter sends the frequency of itself with a synchronization-triggered frame on its clock period, and then all the other inverters determine the frequency of the interval between the two frames. For the other inverters, the frame is also taken as the reference phase, which can correct the phase error of the sine signal. However, the communication data exchange speed and quality fall as the CAN busloads increase. The phase synchronization method will cause frequency offset and voltage distortion. Therefore, a PWM carrier period based parallel inverter synchronization control method based on a CAN bus was proposed in the paper. The method works in dynamic master/slave mode.

In the CAN protocol, the pulse width modulation period is selected as the basic communication period. The period is divided into 3 ranges, according to the zero point of ABC phase voltage. Each range is divided into 3 time periods, exclusive, arbitration, and free. In the exclusive time period, the most important message is delivered. In the design of the CAN application layer, the master dynamic setting was implemented on the ID allocation, in which the address is allocated dynamically, and the master is determined. When the system is powered on, or the new one is connected, all the inverters will get this information, and then send the serial numbers and connected phase name to the bus. They can receive the serial numbers and connected phase name of the others later. The master inverters will be decided on the given rule of the serials number. If the master stops sending synchronization signals, the dynamic setting will be repeated again to make the new one.

The simulation and experiment of parallel inverters were finished in the carrier period based phase synchronization method. In simulation, the phase change and frequency change methods were adopted to compare with the proposed methods. The reference voltage was set to 220 volts, 50 Hertz, and zero initial phase angles. In the result, the proposed method reduces the voltage distortion from 26.7% to 8.8%, compared to the phase change method, while reducing the frequency offset from 16.67 Hertz to 0, compared to the frequency change method. It can be proved from the simulation in Matlab that the method can achieve low distortion and little frequency offset, compared to the other methods. Four inverters were engaged in the experiment, and that is enough to show all the possible capacity enlarging cases with no extra expense. The controller of the inverters was developed on the popular digital processor, which is TMS320F28335 from Texas Instrument. The results show the phase synchronization errors keep within 1° between the inverters in the same phase, or different phases.

Key words: distributed power generation, synchronization control, algorithms, parallel inverter, CAN bus