

逆变器多层控制无线并联技术

华明¹, 胡海兵¹, 邢岩¹, 张岳明², 张伟², 刘凯¹, 杨伟¹

(1. 江苏省新能源发电与电能变换重点实验室(南京航空航天大学), 江苏省南京市 210016;
2. 南京华士电子科技有限公司, 江苏省南京市 211106)

Hierarchical Control for Inverters in Parallel Operation Without Interconnection

HUA Ming¹, HU Haibing¹, XING Yan¹, ZHANG Yueming², ZHANG Wei², LIU Kai¹, YANG Wei¹

(1. Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China;
2. Nanjing HuaShi Electronic Science and Technology Co., Ltd, Nanjing 211106, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: In order to cope with the drawbacks of conventional droop method, a hierarchical control for inverters in parallel operation without interconnection is proposed referring to the hierarchical control applied to power dispatching in AC power systems. The hierarchical control consist of three levels. The primary control is based on an improved droop method, the sharing of the active and reactive power in each module is controlled and balanced by adjusting the phase and amplitude of the output voltage respectively. The secondary control is to compensate the droop of the output voltage from its reference, induced by the droop control, to improve the load regulation performance of the inverter. The last but not the least control limits the phase deviation between the inverter and the shared AC bus in order to ensure all the parallel inverters keeping in phase with each other. The operational principle and implementation was analyzed in detail. A prototype, configured by two paralleled inverters, was set up, on which many dynamic and steady experiments were carried out. Experiment results verify the validity of the proposed control.

KEY WORDS: inverters; parallel operation; droop method; hierarchical control; current sharing

摘要: 研究逆变器无互联线冗余并联系统, 针对传统无互联

线下垂控制的不足, 借鉴电力系统中应用于功率调度的分层控制方法, 提出多层控制方法。第1层为改进的PQ下垂算法, 对系统的频率及初始相位同时进行调节, 以兼顾提高系统的动态和稳态性能; 第2层控制检测系统交流母线电压的频率及幅值, 以补偿下垂控制损害的负载调整率; 第3层控制检测交流母线电压相位, 实施直接同步调节, 减小投入并联瞬间的冲击并避免动态相位失步。详细分析控制原理及各层控制之间的关系协调, 并给出采用常规数字信号处理器的实现方法。由2台三相逆变器组成的并联系统的实验结果表明, 多层控制无线并联方法实现了逆变器并联系统运行的稳定性和可靠性, 具有好的动态和稳态性能。

关键词: 逆变器; 并联运行; 下垂控制; 多层控制; 均流

0 引言

越来越多的直流及交流供电场合采用多模块并联构成分布式冗余供电系统, 以实现系统的大容量、高可靠性和可扩展性。对于逆变器的并联均流控制, 国内外研究提出了很多种方法, 主要分为主从式、分布式和无互联线方式^[1-2], 其中无互联线并联控制方法因其硬件简单的特点而备受关注^[3-13]。这是一种完全冗余的并联方案, 它基于外特性下垂法原理, 在稳态及动态过程中, 根据逆变器输出的有功和无功功率调节基准电压信号的相位和幅度实现并联^[14]。但是, 传统的下垂控制法存在稳定性隐患^[15], 文献[15]提出了一种解耦控制方法对此加以改善, 利用线路电抗、电阻和负载电阻对功率计算方法进行解耦, 实现较为复杂。另外, 传统的下

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200802871040); 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室基金(SKLD09KM09)。

Project Supported by Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (200802871040); Supported by Foundation of State Key Lab of Power System (SKLD09KM09).

下垂控制动态响应慢,热插拔性能较差,易导致动态过载保护;下垂控制算法也令系统输出电压的幅值及频率(外特性)随着负载变化而变化,导致系统的输出外特性变软,不容易满足负载调整率指标^[16]。

电力系统领域,用于功率调度的分层控制已经成熟并得到广泛应用^[17]。欧洲输电协调联盟(Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, Continental Europe, UCTE)定义了应用于电力发电系统的分层控制方法,对拥有大的惯性和感性特性的同步发电机进行控制。利用分层控制可以限制输出电压的幅值及频率与额定值的偏移量,从而保证发电系统的电压和频率质量,保证电力系统较硬的输出外特性,提高了系统的安全性和稳定性。

本文借用电力系统的分层控制原理,提出一种无线并联的多层控制方法,同时研究各控制层之间的协调。意在兼顾和提高并联系统的动态性能、稳定性和可靠性,并改善并联系统的输出负载调整率及外特性。

1 多层控制技术及其原理

1.1 多层控制的含义

本系统的逆变器模块主电路为两电平三相桥拓扑、LC 输出滤波,模块之间有并联均流电感。采用常规的电压电流双闭环 PI 调节和空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)实现单模块三相正弦输出电压稳定,然后加入多层控制外环实现无线并联。

所谓的多层无线并联控制包括:

1) 第1层为改进的 PQ 下垂算法。逆变器根据本模块有功功率 P 、无功功率 Q 获得频率下垂调节量 Δf_P 、相位下垂调节量 $\Delta \theta_P$ 和幅值下垂调节量 Δu , 分别微调其给定频率 f_r 、初始相位和电压基准幅值。

2) 第1层控制会导致并联系统输出电压的幅度和频率随着负载增大而跌落,即外特性下垂。第2层通过采样交流功率母线电压幅值及频率,分别与模块交流输出电压幅值给定 U_{busr} 、频率给定 f_{busr} 比较,利用误差值调节基准给定、补偿负载调整率。

3) 为了减小热投入并联瞬间的冲击,并提高系统并联运行的稳定性和可靠性,加入第3层控制,即直接同步调节。采样交流母线电压相位 θ_{acl} 并以

此作为基准,在逆变器投入并联前调节自身相位 θ ,使之尽量接近 θ_{acl} 后并联;稳态时实时检测本逆变器的相位基准信号 θ ,当 θ 与 θ_{acl} 的偏差 $\Delta \theta_s$ 超过设定范围(例如 5°)时,实施本层直接同步调节,修正 θ 值、快速跟踪 θ_{acl} ,将本逆变器牵入同步。

1.2 第1层控制

常规无线并联控制特性为

$$\begin{cases} f_{\text{fm}} = f_r - \Delta f_P = f_r - k_{PF} P \\ U_{\text{refmr}} = U_{\text{refm}} - \Delta u = U_{\text{refm}} - k_Q Q \\ U_{\text{dref}} = U_{\text{refmr}} \\ U_{\text{qref}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{refm} 为 f_r 经过 U/f 控制后得到的基准信号的幅值; f_{fm} 和 U_{refmr} 分别为经过下垂调节后的新的基准信号的频率和幅值; k_{PF} 和 k_Q 为有功功率频率下垂系数和无功功率幅值下垂系数,均为正数; U_{dref} 和 U_{qref} 为 d 轴和 q 轴的电压给定。

以2台逆变器并联运行为例分析。对每个逆变器模块,根据式(1)可以得到其相位 θ 的表达式:

$$\begin{cases} \theta_1 = \int 2\pi(f_r - \Delta f_{P1}) dt & (\text{逆变器 1}) \\ \theta_2 = \int 2\pi(f_r - \Delta f_{P2}) dt & (\text{逆变器 2}) \end{cases} \quad (2)$$

两式相减可以得到

$$\theta_1 - \theta_2 = -\int 2\pi(\Delta f_{P1} - \Delta f_{P2}) dt = 2\pi k_{PF} \int [0 - (P_1 - P_2)] dt \quad (3)$$

利用有功功率调节逆变器频率,则有有功功率差 $P_1 - P_2$ 对相位差 $\theta_1 - \theta_2$ 实现积分控制,理论上稳态时 $P_1 = P_2$, 保证两机的 $\theta_1 = \theta_2$ (即保证两机相位同步),为无差控制。再进一步,构造比例积分调节关系,以加快调节速度。改进式(3)可得

$$\theta_1 - \theta_2 = -\int 2\pi(\Delta f_{P1} - \Delta f_{P2}) dt - (\Delta \theta_{P1} - \Delta \theta_{P2}) = 2\pi k_{PF} \int [0 - (P_1 - P_2)] dt + k_{P\theta} [0 - (P_1 - P_2)] \quad (4)$$

加入对相位的直接调节,相当于加入比例项、实现比例积分调节。由此得到改进的下垂算法,如式(5)所示(暂不考虑其他层控制),以兼顾系统有功功率稳态均分和动态调节性能。

$$\begin{cases} f_{\text{fm}} = f_r - k_{PF} P \\ U_{\text{refmr}} = U_{\text{refm}} - k_Q Q \\ \Delta \theta_P = k_{P\theta} P \\ U_{\text{dref}} = U_{\text{refmr}} \cos(0 - \Delta \theta_P) \\ U_{\text{qref}} = U_{\text{refmr}} \sin(0 - \Delta \theta_P) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $k_{p\theta}$ 为有功功率相位下垂系数, $k_{p\theta} \geq 0$ 。与 k_{pf} 类似, $k_{p\theta}$ 与输出阻抗和并机电感值等有关。

1.3 第 2 层控制

第 2 层控制的目的是补偿并联系统负载调整率。本并联系统各逆变器与交流母线之间串接均流电感 L_{pa} , L_{pa} 在逆变器的闭环电压控制环路之外, 造成交流母线电压与逆变器输出电压的偏差。补偿原理图如图 1 所示, 其中 f_{rm} 和 U_{refmr} 分别为第 2 层控制补偿前的逆变器基准频率和电压幅值; $f_{rm} + \Delta f_c$ 和 $U_{refmr} + \Delta U_{mc}$ 分别为补偿后的逆变器基准频率和电压幅值; Δf_c 和 ΔU_{mc} 分别为频率和幅值补偿量。

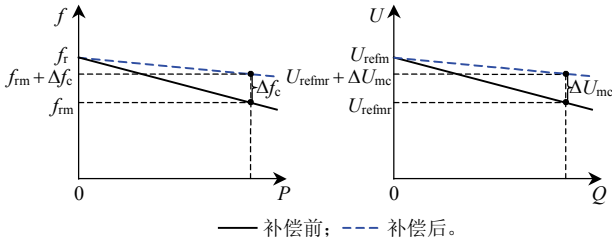


图 1 第 2 层控制补偿原理

Fig. 1 Compensation principle of the secondary control

补偿算法为

$$\begin{cases} f_{rm} = f_r - k_{pf}P + \underbrace{G_f(f_{busr} - f_{buss})}_{\Delta f_c} \\ U_{refmr} = U_{refm} - k_Q Q + \underbrace{G_u(U_{busr} - U_{buss})}_{\Delta U_{mc}} \\ \Delta \theta_p = k_{p\theta}P \\ U_{dref} = U_{refmr} \cos(0^\circ - \Delta \theta_p) \\ U_{qref} = U_{refmr} \sin(0^\circ - \Delta \theta_p) \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{busr} 和 U_{busr} 分别为交流母线电压的频率及幅值给定; f_{buss} 和 U_{buss} 分别为采样计算获得的交流母线电压的频率及幅值; G_f 和 G_u 分别为频率补偿和幅值补偿控制器。

1.4 第 3 层控制

由下垂算法式(1)的由来可知, 在各台逆变器输出的幅度差和相位差都较小的前提下, 近似的有功、无功与频率、幅度的调节关系式才是合理的。另一方面, 在热投入等动态过程中, 根据有功和无功功率调节基准电压信号同步的方法, 由于计算调节过程较缓慢, 会导致环流很大。因此, 在逆变器投入并联之前, 需设法使各模块相位与幅度尽量接近, 并且在动态过程中, 也要快速调节并限制各逆变器的相位与幅度差在某个较小的范围内。

第 3 层控制即直接同步调节, 根据交流母线相位信息 θ_{acl} , 在投入并联前, 控制各台逆变器相位 θ_j ($j=1,2,\dots,n$) 尽量接近 θ_{acl} , 减小并联瞬间冲击; 在稳态运行时, 控制 θ_j 和 θ_{acl} 之间的差值 $\Delta \theta_s$ 在设定的范围内, 防止失步情况的发生。 $\Delta \theta_s$ 可以表示为

$$\Delta \theta_s = \theta_{acl} - \theta_j \quad (7)$$

$\Delta \theta_s$ 为正表示逆变器自身相位滞后 θ_{acl} , $\Delta \theta_s$ 为负表示逆变器自身相位超前 θ_{acl} 。

稳态工作时, 实时判断 $|\Delta \theta_s|$, 设定如下逻辑:

$$S_C = \begin{cases} 1, & |\Delta \theta_s| \geq \theta_{ul} \\ 1 \text{ 或 } 0, & \theta_{ll} \leq |\Delta \theta_s| < \theta_{ul} \\ 0, & |\Delta \theta_s| < \theta_{ll} \end{cases} \quad (8)$$

式中: θ_{ul} 为设定的误差范围上限; θ_{ll} 为设定的误差范围下限; S_C 为第 3 层控制启动标志, 采用滞环逻辑。 S_C 的值为 1 代表启动第 3 层控制; 0 代表停止第 3 层控制; 1 或 0 代表中间态, 此时 S_C 维持上一个阶段的值不变, 即如果上一个阶段 S_C 为 1, 则此阶段 S_C 维持为 1; 如果上一个阶段 S_C 为 0, 则此阶段 S_C 维持为 0。逻辑控制如图 2 所示。

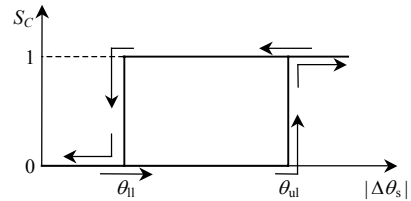


图 2 第 3 层控制逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of the third control

采用多层控制方法, 经过一个原给定周期 $1/f_r$ 后, 逆变器输出相位 θ_m 为

$$\theta_m = \int_0^{1/f_r} 2\pi f_m dt = \int_0^{1/f_r} 2\pi(f_r + \Delta f_c - k_{pf}P) dt - k_{p\theta}P + S_C k_{sc} \Delta \theta_s \quad (9)$$

式中: k_{sc} 为误差调节比例系数, $k_{sc} > 0$; f_m 为经过多层调节后逆变器的输出频率。

根据式(9), 可以得到基于多层控制的频率调节特性:

$$f_m = f_r + \Delta f_c - k_{pf}P - \frac{k_{p\theta}P - S_C k_{sc} \Delta \theta_s}{2\pi} f_r \quad (10)$$

2 多层控制协调及实现方法

实际系统各模块基准电压的幅度给定偏差不大, 取决于器件参数离散性, 而相位差实时随机变

化、调节不利时可能很大。因此,本文提出的多层控制,相位同步控制占据主导地位,对多层控制进行协调主要是对相位同步进行协调控制。

第1、3层均调节同步:第1层控制对频率和相位的调节力度比较小,且调节速度较慢,频率波动小,以保证并联运行的平稳性;第3层控制为直接同步控制,将逆变器牵入同步,以较大的力度进行调节,调节速度快,但是频率波动较大。第2层控制调节属于外层调节,时间常数比较大,调节速度比较缓慢,要求调节的稳态性能好,动态性不做要求。因此第1、2层控制可以同时存在且相辅相成,第3层控制需要根据条件(即 $\Delta\theta_s$)来决定是否加入。于是对各层的协调控制就需要确定 θ_{ul} 和 θ_{ll} 的大小,上述2个值的确定需从2个方面考虑:1)逆变器单机运行时,不希望启动第3层控制;2) N 台逆变器并联带 $M(M \leq N)$ 台额定负载运行时,希望根据相位差启动第3层控制。

逆变器单机运行时,在 dq 坐标下采用PI调节器,故等效为一个直流系统且闭环系统等效输出阻抗为0,所以逆变器输出相电压与其基准给定在相位上是无差的。但逆变器与交流母线之间串接均流电感 L_{pa} , L_{pa} 会使交流母线电压与逆变器输出电压之间存在相位差 $\Delta\theta_{Lpa}$ 。

假定三相负载平衡, N 台逆变器带 $M(M \leq N)$ 台负载并联系统的a相输出端等效电路如图3所示。图中, $U_{ann} \angle \theta_n$ 为逆变器 n 的a相输出电压; $r_{Lpa} + sL_{pa}$ 为逆变器的输出阻抗、线路阻抗及均流电感的感抗之和; Z 为负载; $U_{ao} \angle 0^\circ$ 为并联系统a相输出电压。

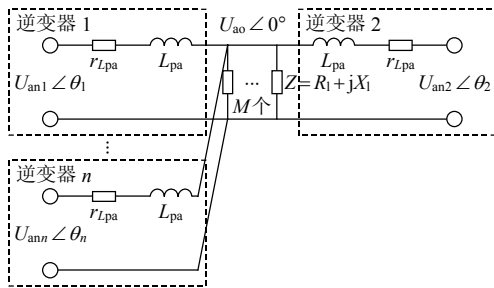


图3 N 台逆变器带 M 台负载并联系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of N inverter modules in parallel with M loads

1) 逆变器单机运行时。

由图3可知,假定 $r_{Lpa} = 0$,单机运行时 $\Delta\theta_{Lpa}$

可以表示为

$$\Delta\theta_{Lpa} = \arctan \frac{R_1 \omega L_{pa}}{R_1^2 + \omega L_{pa} X_1 + X_1^2} \quad (11)$$

单机运行时,不希望启动第3层控制,因此

$$\theta_{ll} > \max(\Delta\theta_{Lpa}) \quad (12)$$

同时,还需满足:

$$\theta_{ll} < \theta_{ul} \quad (13)$$

2) N 台逆变器并联带 $M(M \leq N)$ 台负载运行。

为简化分析,设 $r_{Lpa} = 0$,并假设各逆变模块闭环输出电压一致($U_{an1} = U_{an2} = \dots = U_{ann}$)。对图3电路列写节点电流方程,可求得

$$\Delta\theta_{Lpa} = \arctan \frac{\frac{M}{N} R_1 \omega L_{pa}}{R_1^2 + X_1^2 + \frac{M}{N} \omega L_{pa} X_1} \quad (14)$$

N 台逆变器并联稳定运行时,不启动第3层控制,可以得到

$$\theta_{ul} > \theta_{ll} > \max(\Delta\theta_{Lpa}) \quad (15)$$

通过协调控制,各层控制之间可以很好地实现互补,可以有效地提高并联系统的稳定性和可靠性。

根据以上分析,应用多层并联控制的逆变器控制框图如图4所示。其中,单元1—3分别为所提出的第1—3层控制单元。单元1包括2部分,分别根据本模块自身的有功功率 P 和无功功率 Q ,依据式(5)得到经过下垂调节后的频率给定 f_{rm} 和 d 、 q 轴电压给定 U_{dqref} 。 U_{dqref} 经过电压、电流调节器后,得到用于SVPWM的幅值信息 U_m ; f_{rm} 经过相角计算单元和同步控制单元,得到用于SVPWM的相位信息 θ_m 。利用 U_m 和 θ_m 得到驱动信号驱动逆变桥。单元2中,逆变器检测 u_{ac1s} 得到交流母线电压的频率 f_{buss} 和幅值 U_{buss} ,根据交流母线频率给定 f_{busr} 和幅值给定 U_{busr} ,依据式(6)改善负载调整率。单元3中,采样交流母线电压相位信号 θ_{ac1} 和本机相位 θ ,判断二者相位差,在热并机和动态过程启用直接同步调节。

需要说明的是,本系统考虑负载主要为电机负载的应用场合,各逆变器采用 U/f 控制实现变频软启动,其给定频率 f_r 由0逐渐增加至稳态值(50 Hz)。

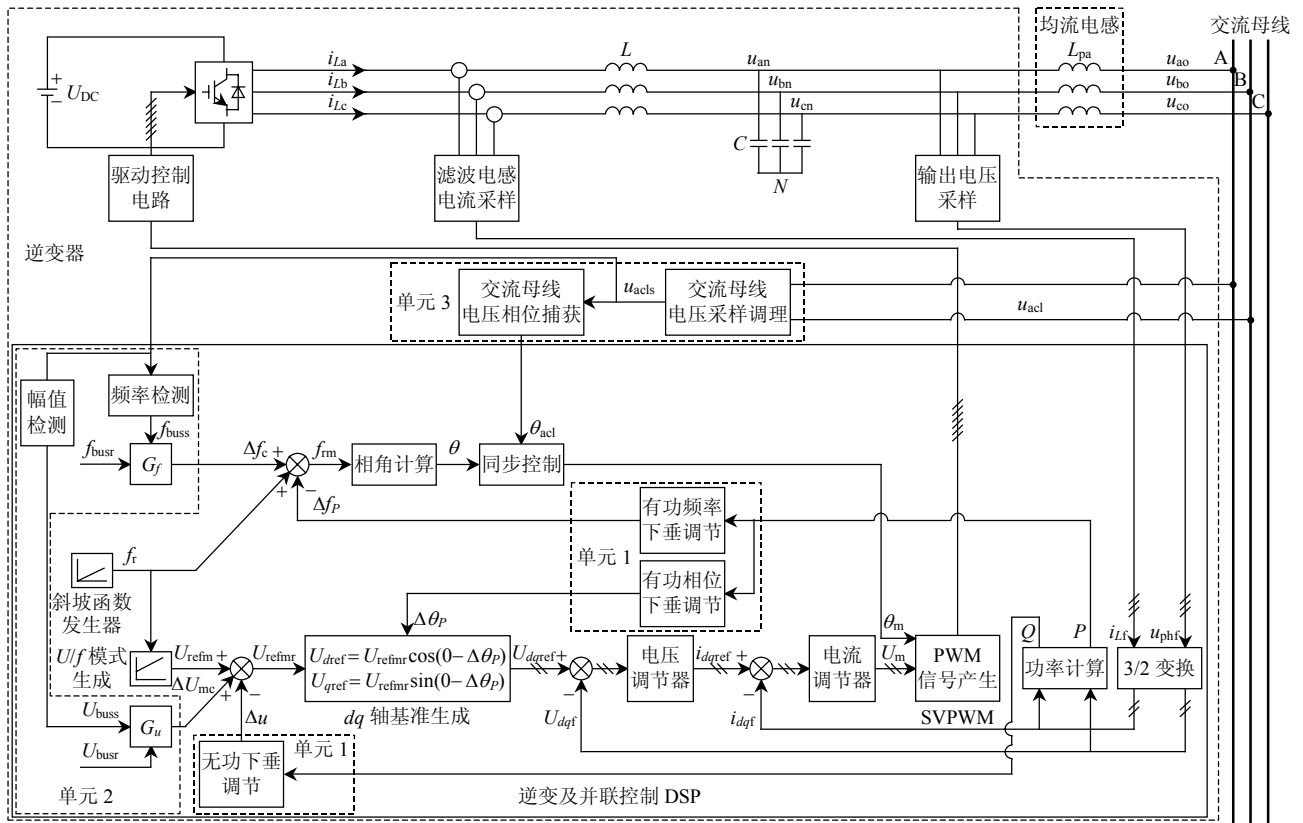


图 4 逆变及多层控制原理框图

Fig. 4 Control diagram of inverter and multi-control

3 实验验证

本文搭建了 2 台三相逆变器组成的并联系统，其应用背景为机车辅助电源。系统结构及控制如图 4 所示，其中额定直流母线电压为 600 V；稳态输出电压为 380 V、50 Hz；逆变器设计容量为 35 kVA。逆变及并联控制 DSP 芯片采用 TI 公司的 TMS320F2812DSP，开关频率为 6 kHz，输出滤波电感 $L=0.6\text{ mH}$ ，滤波电容 $C=50\text{ }\mu\text{F}$ ，均流电感 $L_{pa}=0.8\text{ mH}$ ，实验负载为阻性。

图 5—7 中， u_{an1} 、 u_{an2} 分别为逆变器 1、2 的 a

相相电压； i_{La1} 、 i_{La2} 分别为逆变器 1、2 的 a 相电感电流； θ_{1out} 、 θ_{2out} 分别为逆变器 1、2 的 DSP 根据

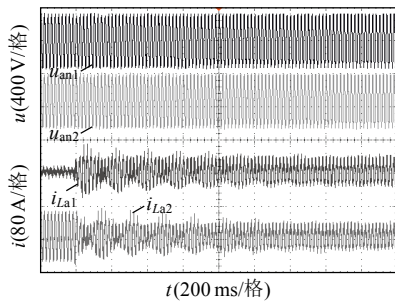
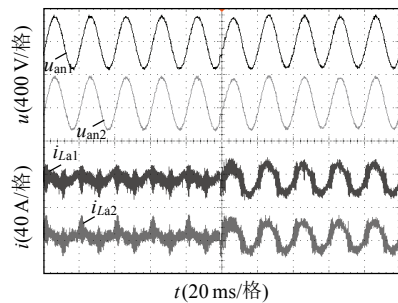
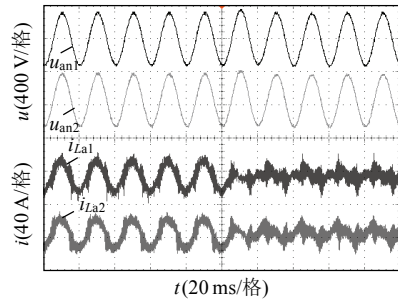


图 5 双机投入并联瞬间实验波形

Fig. 5 Experimental result with hot plug-in



(a) 空载突加至 16kW 阻性负载



(b) 16kW 阻性负载突卸至空载

图 6 并联系统负载突变实验波形

Fig. 6 Experimental results with stepping load

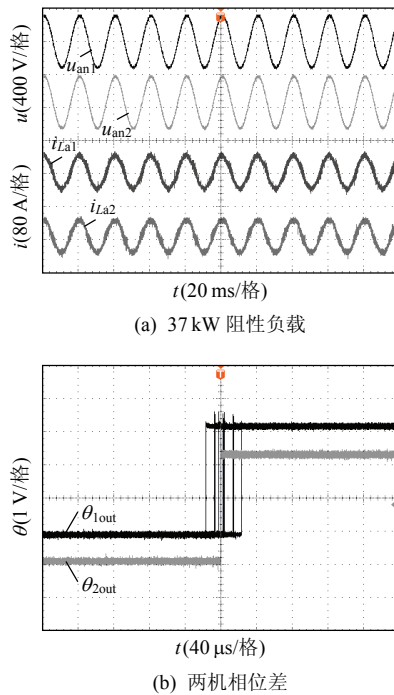


图7 并联运行稳态实验波形

Fig. 7 Experimental results in steady state

自身相位送出的方波信号，上跳沿代表逆变器相位过零点。

图5为2台逆变器热投入并联运行动态波形。由图可见，并联瞬间电流冲击小，母线电压基本无波动。而早期未采用第3层控制时，并联瞬间的相位差不能保证，低压实验时投入瞬间就经常过流保护。

图6为并联系统由空载突加到16 kW阻性负载及突卸负载至空载的实验波形。可以看出，突加、突卸负载时，并联系统电压经过一个周期的调节后即恢复正常，表明并联系统动态特性较好。

图7为并联系统带37 kW阻性负载稳态运行实验波形，其中图7(b)为此时两机相位差的波形。从图中可以看出，系统稳态均流较好，两机相位差不超出 $\pm 0.36^\circ (\pm 20 \mu\text{s})$ 的范围。

表1为并联稳态运行时，实测两逆变模块a相

表1 并联稳态运行两模块a相电感电流

Tab. 1 Phase-a inductor currents of the two inverters

负载/kW	i_{La1}/A	i_{La2}/A	环流/A
空载	4.8	5.7	0.45
10.4	9.0	10.5	0.75
16.0	12.3	13.8	0.75
26.5	21.1	23.0	0.95
37.0	28.0	30.0	1.00

电感电流有效值，可见环流均小于单机额定电流的5%。

由实验观测得到，加入第2层控制使并联系统带37 kW阻性负载时的输出线电压有效值跌落由加入前的3.0 V减小为2.5 V。

4 结论

本文提出了一种基于多层控制的无互联线并联控制方法及实现技术：第1层为改进的PQ下垂算法，对系统的频率及初始相位同时进行调节，以兼顾提高系统的动态和稳态性能；第2层控制检测系统交流母线电压的频率及幅值，以补偿下垂控制损害的负载调整率；第3层控制检测交流母线电压相位，实施直接同步调节，减小了投入并联瞬间的冲击并避免了动态相位失步。理论分析及实验结果表明，多层控制无线并联方法实现了逆变器并联系统的运行稳定性和可靠性，具有好的动态和稳态性能。

参考文献

- [1] He Zhongyi, Xing Yan. Distributed control for UPS modules in parallel operation with RMS voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 2860-2869.
- [2] 邢岩, 严仰光. 电流型调节逆变器的冗余并联控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 199-202. Xing Yan, Yan Yangguang. Control for current regulated inverters in redundant parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 199-202(in Chinese).
- [3] Guerrero J M, Matas J, L G de Vicuña, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [4] Guerrero J M, García de Vicuña L, Matas J, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [5] Brabandere K De, Bolsens B, Keybus J Van Den, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [6] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48. Zhang Yao, Ma Hao, Lei Biao, et al. Analysis of dynamic

- performance for parallel operation of inverters without wire interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 42-48(in Chinese).
- [7] Guerrero J M, García de Vicuña L, Miret J, et al. Output impedance performance for parallel operation of UPS inverters using wireless and average current-sharing controllers[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 2482-2488.
- [8] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. 基于下垂特性控制的无互连线并联 UPS 建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 33-38.
- Lin Xinchun, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 33-38(in Chinese).
- [9] Guerrero J M, L G de Vicuña, Matas J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1205-1213.
- [10] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互连线逆变器并联的均流分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(25): 55-59.
- Zhang Yao, Ma Hao, Lei Biao, et al. Analysis of current equalization for inverter parallel system with no control interconnections[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(25): 55-59(in Chinese).
- [11] Marwali M N, Jung J W, Keyhani A. Stability analysis of load sharing control for distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 737-745.
- [12] De Brabandere K, Bolsens B, Van den Keybus J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [13] 姚伟, 陈敏, 陈晶晶, 等. 一种用于无互连线逆变器并联的多环控制方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 84-89.
- Yao Wei, Chen Min, Chen Jingjing, et al. An improved wireless control strategy for parallel operation of distributed generation inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 84-89(in Chinese).
- [14] 何中一. PWM 逆变器的控制及并联运行控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- He Zhongyi. Research on the control and parallel operation control for PWM inverters[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008(in Chinese).
- [15] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. UPS 无互连线并联中基于解耦控制的下垂特性控制方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 117-122.
- Lin Xinchun, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. The droop characteristic control scheme basing on decoupling control in the parallel operation of UPS with no control connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 117-122(in Chinese).
- [16] Chandorkar M C, Divan D M, Hu Y, et al. Novel architectures and control for distributed UPS systems[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando, FL, USA: IEEE, 1994: 683-689.
- [17] Kundur P. Power system stability and control[M]. California, America: McGraw-Hill Professional, 1994: 1-13.



华明

收稿日期: 2011-03-24。

作者简介:

华明(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, huaming@nuaa.edu.cn;

胡海兵(1973), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子与电力传动;

邢岩(1964), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

(责任编辑 张玉荣)