

多机并网逆变器的并网 / 并联统一控制策略

阚加荣¹, 谢少军², 过 亮³

(1. 盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224051; 2. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 分析了多机并网逆变器系统, 得出其等效电路, 推导出调节逆变器输出电压的相位可以调节逆变器输出有功功率, 调节逆变器的输出电压幅值可以调节逆变器输出的无功功率。根据该理论, 提出了一种多机并网逆变器的并网/并联统一控制策略, 通过有功功率闭环调节逆变器输出电压的频率, 通过无功功率闭环调节逆变器的幅值, 给出了系统的运行流程, 并分析了该方法内在的反孤岛能力。仿真和实验证明, 所提控制策略在逆变器并网与并联时控制效果优良, 并能实现平稳转换。

关键词: 并网; 并联; 逆变器; 间接电流控制; 有功功率; 无功功率; 统一控制; 反孤岛

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.016

0 引言

太阳能、风能以及燃料电池作为新型清洁的能源受到了广泛的关注, 利用这些能源的分布式发电技术成为全球能源可持续发展战略的重要组成部分^[1]。新能源分布式发电的逆变器一般工作在并网运行状态, 以电流控制方式运行, 在某些场合, 并网逆变器也需要以电压控制模式运行, 以便在孤岛状态下能保证本地关键负载的连续运行, 即逆变器需兼具并网和独立运行功能。

电源的模块化技术具有冗余度高、可靠性强、易于扩展、维修方便等一系列优点, 将电源模块化技术应用于新能源并网必将成为今后一段时期的研究热点。电源模块化后, 电网正常运行时, 逆变器控制采用并网控制技术; 电网故障时, 逆变器控制采用并联控制技术。但目前模块化的逆变器并联^[2]和并网控制技术^[3-4]有不同的理论基础, 采用不同的控制方法。

逆变器并联控制技术主要包括集中控制方式^[5]、主从控制方式^[6]、分散逻辑控制方式^[7]以及无互连线并联控制方式^[8-9]。逆变器并网控制技术主要包括直接电流控制技术^[10-13]和间接电流控制技术^[14-15]。模块化电源在并网状态时, 如果采用直接电流控制方式, 逆变器是一个受控电流源, 逆变器输出端的电压由电网决定; 如果采用间接电流控制方法, 逆变器是一个受控电压源, 需要调整逆变器输出电压的相位和幅值, 使并网电流可控。模块化电源处于孤岛状态时, 逆变器需要并联运行, 逆变器为一受控电压

源。可以看出为了避免逆变器并网与并联之间控制模式转换的问题^[16], 并网时逆变器需要采用间接电流控制模式。传统的间接电流控制方法中^[17], 逆变器基准电压的相位角和幅值通过公式计算而来, 所用的变量包括电感值, 而电感值在工作过程中可能受多种因素影响而发生变化, 会造成幅值和相位角计算不准确。文献^[18]提出了一种改进的间接电流控制方法, 使逆变器的基准电压幅值始终等于电网电压的幅值, 将进网电流闭环以调节逆变器基准电压的相位, 从而实现逆变器并网, 该方法不需要直接计算逆变器基准电压的相位角和幅值, 克服了传统间接电流控制方法的缺点, 但它未对逆变器基准电压的幅值进行调节, 进网电流与电网电压必然存在相位差, 造成进网功率因数小于 1。这些间接电流并网控制策略都不能直接用于逆变器并联控制。

根据逆变器并联和间接电流型并网的有功调频、无功调幅的基本控制理论, 提出了一种多机并网逆变器的并网/并联统一控制策略, 单台逆变器采用电感电流瞬时值内环、输出电压外环的电压型控制方式^[19], 该控制方式具有一定的反孤岛性能^[20]。利用有功功率闭环调节逆变器基准电压的相位、无功功率闭环调节基准电压的幅值, 实现逆变器并联和并网统一控制。

1 多机并网逆变器系统

图 1 为采用了模块化电源技术后的多机并网逆变器系统。系统中, 有 n 个模块化的逆变电源, 每个模块化电源输出通过开关 $S_i (i=1, 2, \dots, n)$ 并联连接到母线上, 本地关键负载直接连接到并联母线上, 并联母线通过开关 S 连接到电网上。电网正常工作时, 开关 S 闭合, 并联母线电压即为电网电压, 每台逆变器均工作于并网状态, 将新能源发出的电能一部分供给本地关键负载, 多余能量输送给电网; 电网故障

收稿日期: 2012-03-11; 修回日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51107108, 51077070); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (12KJB470013); 江苏省“青蓝工程”青年骨干教师培养对象资助项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51107108, 51077070), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (12KJB-470013) and Qing Lan Project

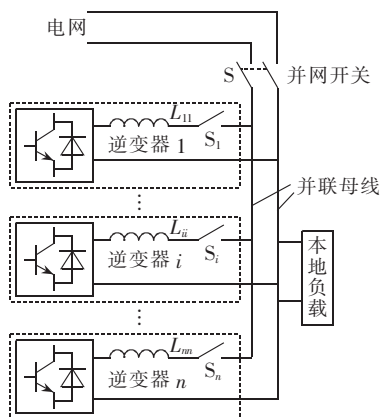


图 1 多机并网逆变器系统

Fig.1 Multiple grid-connected inverters system

时,通过多机并网逆变器的孤岛检测技术^[21],断开并网开关 S,逆变器立即以并联控制技术运行,并保证本地关键负载以额定电压值稳定运行。

2 有功调频、无功调幅控制原理

文献[22]指出,瞬时电流内环、电压外环控制的电压型逆变器可以等效为一个受控电压源与逆变器等效输出阻抗相串联,因此,多机逆变器并网系统的等效电路如图 2 所示。图中 $r_i + jX_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为逆变器等效输出阻抗与逆变器、电网之间线路阻抗之和。一般情况下为抑制并网电流的高次谐波,在逆变器和电网之间串接一个电感值较小的电感。令并联母线的电压为 $U \angle 0^\circ$,若系统处于并网状态,则 $U \angle 0^\circ$ 即为电网电压;若系统处于并联状态,则 $U \angle 0^\circ$ 即为各逆变器并联后所得母线电压。各逆变电源的输出电压为 $U_{Si} \angle \varphi_i (i=1, 2, \dots, n)$,在逆变器并网或并联稳定运行时, U_{Si} 接近于 U ,而 φ_i 一般都较小。

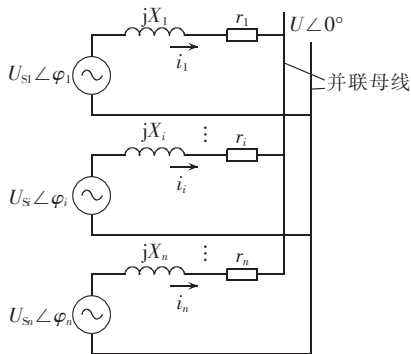


图 2 多机并网逆变器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of multiple grid-connected inverters

图 3 给出了单台并网逆变器单位功率因数时电压、电流的矢量图。根据矢量图中的关系,可以计算出逆变器输出电压所需的相位角和幅值,这就是传统的间接电流型并网控制方法。下面通过不同的角度来描述图 2 所示的多机并网逆变器等效电路。

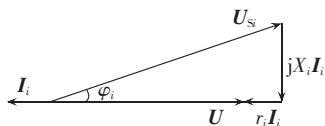


图 3 单位功率因数时的矢量图

Fig.3 Vector diagram with unity power factor

根据图 2,得第 i 台逆变器进网电流为:

$$I_i = [U_{Si}(\cos \varphi_i + j \sin \varphi_i) - U] / (r_i + jX_i) \quad (1)$$

则流进母线的视在功率大小为:

$$S_i = UI_i = P_i + jQ_i \quad (2)$$

$$P_i = \frac{r_i U_{Si} U \cos \varphi_i - r_i U^2}{X_i^2 + r_i^2} + \frac{X_i U_{Si} U}{X_i^2 + r_i^2} \sin \varphi_i$$

$$Q_i = \frac{X_i U_{Si} U \cos \varphi_i - X_i U^2}{X_i^2 + r_i^2} - \frac{r_i U_{Si} U}{X_i^2 + r_i^2} \sin \varphi_i$$

根据逆变器输出阻抗的表达式^[22],在电流环积分参数较大时,逆变器等效输出阻抗中阻性分量很小,且由于逆变器与母线间串接电感,可近似认为 $r_i \approx 0$ 。并网运行时,逆变器输出电压的相位与电网电压相位差很小,可近似认为 $\sin \varphi_i \approx \varphi_i, \cos \varphi_i \approx 1$,则有功和无功功率可表示为:

$$P_i = \frac{U_{Si} U}{X_i} \varphi_i \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{U_{Si} U - U^2}{X_i} \quad (4)$$

对式(3)进行微分,得:

$$\Delta P_i \approx (U/X_i)(U_{Si} \Delta \varphi_i + \Delta U_{Si} \varphi_i + \Delta U_{Si} \Delta \varphi_i) \quad (5)$$

在数值的大小上,相位差 φ_i 要远小于幅值 U_{Si} ,所以式(5)可以近似为:

$$\Delta P_i \approx \frac{U U_{Si}}{X_i} \Delta \varphi_i \quad (6)$$

在时间 t 内,逆变器和母线之间的相位差变化为:

$$\Delta \varphi_i = \int_0^t (\omega_{Si} - \omega) dt = \int_0^t \Delta \omega dt \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得:

$$\Delta P_i \approx \frac{U U_{Si}}{X_i} \int_0^t \Delta \omega dt \quad (8)$$

同理对式(4)进行微分可得:

$$\Delta Q_i \approx \frac{U}{X_i} \Delta U_{Si} \quad (9)$$

从式(8)和式(9)可以看出,不管逆变器处于并网状态还是并联状态,都可以通过调节逆变器输出电压的频率来调节逆变器输出的有功功率,调节逆变器的幅值就可以调节逆变器输出的无功功率。所不同的是,在并网状态下,逆变器给定的功率基准是根据新能源最大功率点跟踪(MPPT)算法得到的,除了保证本地负载供电以外,还将多余的能量送给电网;逆变器并联运行时,在保证本地负载稳定运行前提下,逆变器给定的功率基准是本地负载所消耗功率在各个逆变器模块中的均分。

3 多机并网逆变器并联/并网统一控制策略

基于以上理论分析,提出了一种新的基于有功调节逆变器频率、无功调节逆变器幅值的多机并网逆

变器并联/并网统一控制策略。图 4 为第 i 台逆变器整体系统框图,其他逆变器的主电路和控制框图都与图 4 一致。
图 4 中,在逆变器在切入并联母线之前,首先通

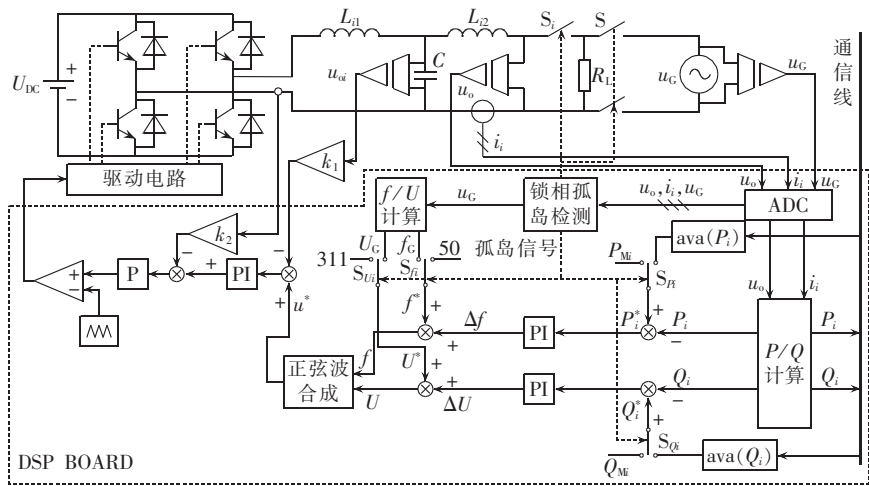


图 4 多机并网逆变器并联/并网统一控制策略框图

Fig.4 Unified control strategy of multiple inverters for grid-connected and parallel operating modes

过孤岛检测保护检测电网是否正常工作,如果电网正常,则闭合并网开关 S ,每一台逆变器通过锁相环跟踪上电网的相位后,闭合各自的切入开关 S_i 并网运行,逆变器运行于并网控制状态;如果电网故障,系统处于孤岛状态,并网开关 S 断开,此时每一台逆变器都检测并联母线电压,如果并联母线无电压,则逆变器直接闭合切入开关 S_i ,一旦有一台逆变器并入母线,则其他逆变器模块都要向母线锁相后再并入母线实现逆变器并联,逆变器运行于并联状态。逆变器并联或并网运行的判断流程如图 5 所示。

2 个功率闭环的基准在并联和并网时如式 (10) 和式 (11) 所示。

$$P_i^* = \begin{cases} P_{M_i} & \text{并网} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i & \text{并联} \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_i^* = \begin{cases} Q_{M_i} & \text{并网} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i & \text{并联} \end{cases} \quad (11)$$

式 (10) 和式 (11) 中, P_{M_i} 为新能源 MPPT 得到的最大功率值;而 Q_{M_i} 为根据需要设定的无功值,一般情况下为 0。并联运行时,功率基准值即为各个逆变器模块产生的功率和的平均值,其他模块所发出的有功功率和无功功率通过通信线获得。

根据式 (8) 和式 (9) 可知有功功率闭环和无功功率闭环输出的量为需要调节的频率差 Δf 和幅值差 ΔU ,将它们分别与基准频率值和基准幅值相加,并网和并网时,基准频率和幅值分别为:

$$f_i^* = \begin{cases} f_G & \text{并网} \\ 50 \text{ Hz} & \text{并联} \end{cases} \quad (12)$$

$$U_i^* = \begin{cases} U_G & \text{并网} \\ 311 \text{ V} & \text{并联} \end{cases} \quad (13)$$

其中, f_G 和 U_G 分别为电网电压的频率和幅值。式 (10) — (13) 的切换是通过孤岛检测信号决定的,发生孤岛时,逆变器运行于并联状态。

将得到的频率值 f 和幅值 U 合成一正弦波,作为逆变器的基准电压,为使逆变器具有较快的动态特性和较好的波形质量,逆变器采用电感电流瞬时值内环、输出电压外环的控制方式。由于有功功率闭环和无功功率闭环的基准为直流量,因此并网时逆

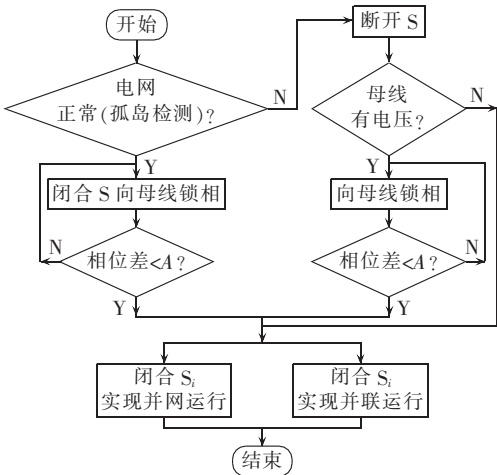


图 5 并联/并网运行判断流程

Fig.5 Flowchart of grid-connected/parallel mode selection

由并联母线电压和逆变器输出电流计算出逆变器输出的有功功率 P_i 和无功功率 Q_i ,将这 2 个量分别作为有功功率闭环和无功功率闭环的反馈量,这

变器的输出功率可以实现无静差跟踪,并联时逆变器可以很好地均分负载电流。

逆变器在并联和并网状态时的整套控制系统是统一的,区别仅在于功率、频率和幅值的基准值不一致,它们通过孤岛检测信号进行切换。本系统的控制全部在 DSP 中实现。

4 控制策略内在的反孤岛能力

根据图 4 中所采用的多机逆变器的并联/并网统一控制策略,合成逆变器基准电压的频率和幅值的表达式分别为:

$$f_{k+1} = f_{Gk} + k_{pf}(P_{Me} - P_{ik}) + k_{if} \int_0^t (P_{Me} - P_{ik}) dt \quad (14)$$

$$U_{k+1} = U_{Gk} + k_{pU}(Q_{Me} - Q_{ik}) + k_{iU} \int_0^t (Q_{Me} - Q_{ik}) dt \quad (15)$$

其中, k_{pf} 、 k_{pU} 、 k_{if} 和 k_{iU} 分别是有功功率闭环和无功功率闭环的比例系数和积分系数; P_{Me} 和 Q_{Me} 是基准功率值,正常情况下这 2 个值在短时间内保持不变; P_{ik} 和 Q_{ik} 分别是第 k 个工频周期内逆变器输出的有功功率和无功功率; f_{Gk} 和 U_{Gk} 分别是检测到的并联母线上电压的频率和幅值; f_{k+1} 和 U_{k+1} 分别是逆变器在第 $k+1$ 个工频周期内基准电压的频率和幅值。

电网正常时, f_{Gk} 和 U_{Gk} 为电网电压的频率和幅值,此时 $P/f(\omega)$ 以及 Q/U 满足式(8)和式(9)的数学关系,有功功率闭环改变逆变器输出电压的频率并与电网电压频率相等,并使其相位紧跟电网电压相位;无功功率闭环调节逆变器输出电压的幅值,使其幅值稳定在某一固定值。

电网发生故障,可以从本地负载的功率因数 $\cos \varphi_L$ 的情况不同来说明:若 $\varphi_L \neq 0$,则可以检测出逆变器的输出电流和电网侧的电压相位差不为 0,可检测出孤岛发生;若 $\varphi_L = 0$,则逆变器输出电流与电网侧电压相位差继续为 0,从相位的角度不能判断孤岛是否发生。

当 $\varphi_L = 0$ 、电网故障时,因为逆变器属于电压控制型,逆变器基准电压未发生突变,其输出电压未发生变化,但逆变器输出功率却因电网故障发生了变化。此时检测得到母线电压的 f_{Gk} 即为逆变器并联以后的等效频率,即近似等于逆变器的输出电压频率,那么式(14)变为:

$$f_{k+1} = f_k + k_{pf}(P_{Me} - P_{ik}) + k_{if} \int_0^t (P_{Me} - P_{ik}) dt \quad (16)$$

可以看出,当并网时的基准功率 P_{Me} 大于本地负载吸收的有功功率 P_L ($P_{Me} > P_L$) 时,检测到电网侧的电压频率持续变大;当 $P_{Me} < P_L$ 时,检测到电网侧的电压频率持续变小。只要检测出频率超出文献[23]所规定的范围,就可以认为电网出现故障,切断并网开关 S,实现孤岛保护。当频率值超出规定限度

时,判断孤岛发生。

当 $\varphi_L = 0$ 且 $P_{Me} = P_L$ 时,本文所提控制策略不能检测出孤岛情况的发生,但这种情况发生的几率极小,可以结合其他孤岛检测方法[24]来检测。因此本控制策略孤岛检测的盲区极小。

5 仿真和实验验证

根据本文所提的控制方案,用 MATLAB7.1 仿真软件建立了 2 台全桥单相逆变器的仿真模型,对照图 4 系统整体框图,仿真参数如下:电感 $L_{i1} = 2.4$ mH,电感 $L_{i2} = 1$ mH,电容 $C_i = 20$ μ F,本地负载 20 Ω ,三角载波幅值 12 V,输入直流电压 $U_{DC} = 400$ V,开关频率 $f_{SW} = 10$ kHz,有功功率基准 $P_{Me} = 3\,000$ W,无功功率基准 $Q_{Me} = 0$ var,有功功率环 PI 参数 $0.001 + 0.01/s$,无功功率环 PI 参数 $0.000\,12 + 0.001\,5/s$,瞬时电压环 PI 参数 $0.5 + 2\,500/s$,瞬时电压环反馈系数 $k_1 = 0.025\,7$,瞬时电流环 P 参数为 4,瞬时电流环反馈系数 $k_2 = 0.2$ 。

图 6 为单台逆变器在静态和动态情况下的电流波形,可以看出,稳态时,逆变器输出电流和电网电压的相位保持一致;在功率基准突变时,逆变器的输出电流调节大约需要 10 个周期的时间,这也是间接电流控制策略的一个缺点。

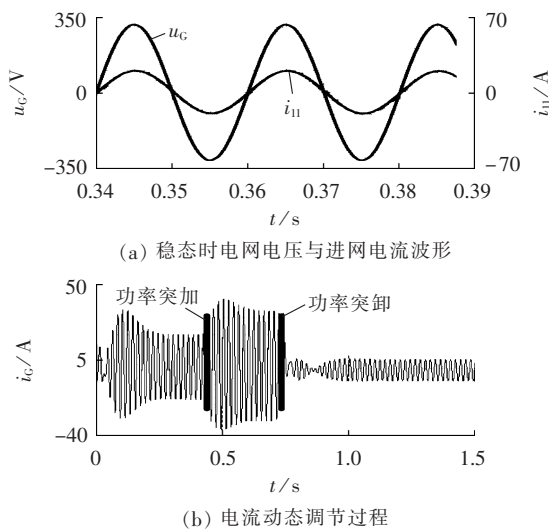


图 6 并网时电流仿真波形

Fig.6 Simulative current waveforms in grid-connected mode

图 7 给出了 2 台逆变器在由并网向并联切换的动态过程。电网在 0.4 s 时发生故障,在 0.5 s 处检测到孤岛存在。图 7(a)给出了 2 台逆变器基准正弦波合成的频率和幅值的调节过程,可以看出逆变器在并网时,逆变器单元的频率和幅值在初始值不一致的情况下能相互趋近;电网发生故障时,逆变器输出电压的频率和幅值也没有发生太大的变化。图 7(b)为逆变器输出功率以及功率基准波形,电网故障以

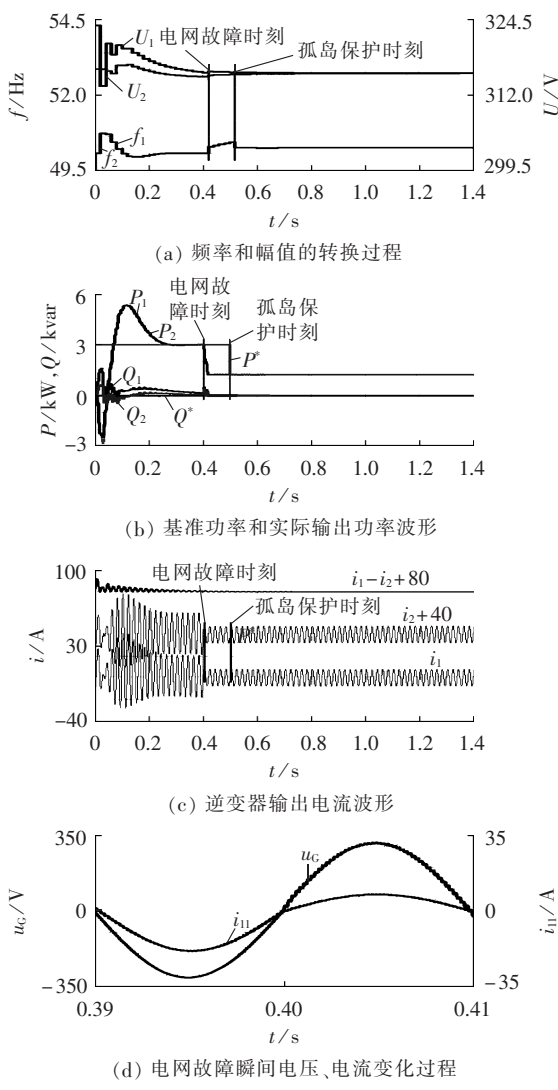


图 7 系统并网向并联切换过程波形

Fig.7 Simulative waveforms during transition from grid-connected mode to parallel mode

前,逆变器的输出功率已经跟踪上基准电压;电网检测到孤岛发生时,逆变器的功率基准变为 2 台逆变器输出功率的平均值,此后逆变器实现并联控制运行。图 7(c)为逆变器输出电流波形,电网故障时,系统能自动根据本地负载的大小实现逆变器输出电流的减小,并在逆变器并联控制运行后实现对本地负载电流的均分。图 7(d)为逆变器在电网故障发生时刻(0.4 s)的并联母线电压以及单台逆变器输出电流波形,可以看出,负载上电压平稳过渡,没有对负载造成冲击,这也是间接电流控制型并网逆变器在模式切换过程中相对于直接电流控制型的一个优点。

为了验证该控制策略理论分析的正确性,研制了 2 台基于 TMS320LF2407A 的并网逆变器,容量均为 1 kV·A,其余电路参数和控制参数与仿真参数相同,2 台 DSP 之间通过 CAN 总线实现数据通信。图 8 为单台逆变器处于独立运行状态和并网状态时的电压和电流波形。可以看出,在并网逆变器独立运行模

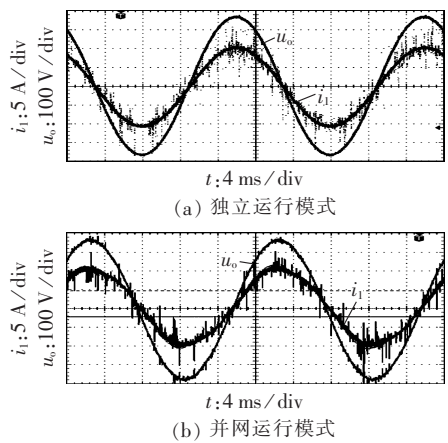


图 8 单台逆变器运行波形

Fig.8 Waveforms of single inverter in operation

式时,由于采用了瞬时双环的控制策略,逆变器输出电压的正弦性好,THD 值很低;在逆变器处于并网状态时,由于电网电压含有低次谐波,逆变器输出电流含有一定的低次谐波,THD 值稍高,但仍满足文献[23]规定的小于 5% 的要求。

图 9 为 2 台逆变器处于并网运行和并联运行时的波形。图 9(a)和(b)分别为 2 台逆变器并网运行,突加和突卸有功功率基准时电网电压和逆变器输出电流的波形,可以看出系统稳定运行,但是由于间接电流控制型的固有缺点,其动态性能较差。图 9(c)为 2 台逆变器处于并联运行时两者的输出电流波形,2 台逆变器能够较好地均分本地负载。采用统一控制策略的逆变器处于并联和并网运行时,都能够稳定运行。

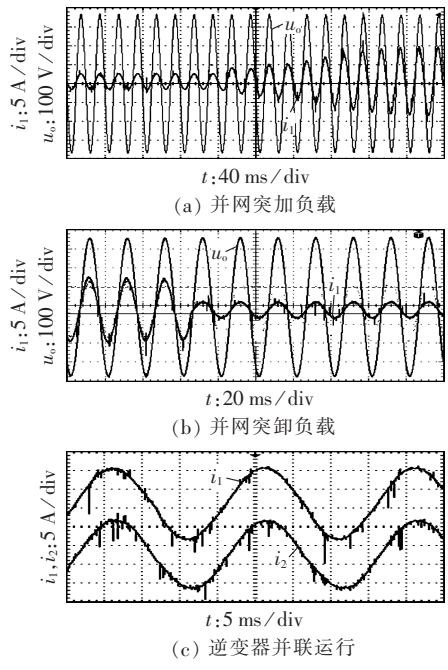


图 9 多机逆变器并联/并网运行波形

Fig.9 Waveforms of multiple inverters in grid-connected/parallel operating mode

6 结论

本文分析了多机并网逆变器系统,提出了一种新型的多机并网逆变器的并网/独立(并联)统一控制策略:

a. 调节并网逆变器输出电压的相位能调节逆变器输出的有功功率;

b. 调节并网逆变器输出电压的幅值能调节逆变器输出的无功功率;

c. 引入有功功率闭环和无功功率闭环分别调节逆变器输出电压的频率和幅值,保证逆变器输出功率实现无静差跟踪;

d. 所提控制策略有其内在的反孤岛能力;

e. 逆变器并网控制时和并联控制时,仅功率、频率和幅值的基准值不一致,控制策略一样,保证了孤岛发生时,本地负载不受冲击。

仿真和实验结果表明,所提多机并网逆变器统一控制策略具有优良的性能。

参考文献:

- [1] NIGIM K A,ZOBAA A F. Development and opportunities of distributed generation fuelled by renewable energy sources[J]. International Journal of Global Energy Issues,2006,26(3):215-231.
- [2] RAMOS R,BIEL D,GUINJOAN F,et al. Distributed control strategy for parallel-connected inverters-sliding mode control approach and FPGA-based implementation[C]//IEEE IECON. Sevilla, Spain;IEEE,2002:111-116.
- [3] 柳明,柳文. 基于电压的自治微电网分布式协调控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):20-24.
LIU Ming,LIU Wen. Voltage-based distributed control of autonomous microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):20-24.
- [4] 王鹤,李国庆. 含多种分布式电源的微电网控制策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):19-23.
WANG He,LI Guoqing. Control strategy of microgrid with different DG types[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):19-23.
- [5] CHEN Y K,WU Y E,WU T F,et al. CWDC strategy for paralleled multi-inverter systems achieving a weighted output current distribution[C]//IEEE APEC. Texas,USA;IEEE,2002:1018-1023.
- [6] IU H H C,TSE C K. Instability and bifurcation in parallel-connected Buck converters under a master-slave current sharing scheme[C]//IEEE PESC. Vancouver,Canada;IEEE,2000:708-713.
- [7] SUN Xiao,LEE Yimshu,XU Dehong. Modeling,analysis,and implementation of parallel multi-inverter systems with instantaneous average-current-sharing scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,18(3):844-856.
- [8] GUERRERO J M,MATAS J,de VICUÑA L G,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.
- [9] 阚加荣,谢少军,吴云亚. 无互连线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报,2008,28(21):40-45.
- KAN Jiarong,XIE Shaojun,WU Yunya. Research on decoupling droop characteristic for parallel inverters without control inter-connection[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(21):40-45.
- [10] XUE Yaosuo,CHANG Liuchen,KJAER S B,et al. Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators:an overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2004,19(5):1305-1314.
- [11] KAZMIERKOWSKI M P,MALESANI L. Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters;a survey [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics,1998,45(5):691-703.
- [12] HO M T,CHUNG H. An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(4):953-962.
- [13] 顾和荣,杨子荣,郭伟扬. 并网逆变器输出电流滞环跟踪控制技术[J]. 中国电机工程学报,2006,26(9):108-112.
GU Herong,YANG Zirong,WU Weiyang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(9):108-112.
- [14] 吴浩伟,段善旭,徐正喜. 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J]. 中国电机工程学报,2008,28(33):19-24.
WU Haowei,DUAN Shanxu,XU Zhengxi. A novel control scheme of grid-connected inverters based on voltage-controlled mode [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(33):19-24.
- [15] YU Taesik,CHOI Sewan,KIM Hyosung. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters for seamless transfer [C]//IEEE PESC. [S.l.]:IEEE,2006:1-6.
- [16] TIRUMALA R,MOHAN N,HENZE C. Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between utility-interactive and stand-alone modes[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference. Dallas,USA;IEEE,2002:1081-1086.
- [17] 张承慧,李珂,杜春水,等. 基于幅相控制的变频器能量回馈控制系统[J]. 电工技术学报,2005,20(2):41-45.
ZHANG Chenghui,LI Ke,DU Chunshui,et al. An energy-feedback control system of inverter based on phase and amplitude control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(2):41-45.
- [18] KIM Hyosung,YU Taesik,CHOI Sewan. Indirect current control algorithm for utility interactive inverters in distributed generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(3):1342-1347.
- [19] 陈东华,谢少军,周波. 瞬时值电流控制技术比较[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(3):343-347.
CHEN Donghua,XIE Shaojun,ZHOU Bo. Comparison of instantaneous current-control inverter techniques [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2004,36(3):343-347.
- [20] 李军,黄学良,陈小虎,等. 基于双重判据的微电网快速孤岛检测技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):38-56.
LI Jun,HUANG Xueliang,CHEN Xiaohu,et al. Detection of islanded microgrid based on double criterions[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):38-56.
- [21] 刘方锐,段善旭,康勇. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术[J]. 电工技术学报,2010,25(1):167-171.
LIU Fangrui,DUAN Shanxu,KANG Yong. Islanding detection methods for multiple PV converters system[J]. Transactions of

- China Electrotechnical Society, 2010, 25(1):167-171.
- [22] 阚加荣. 单相逆变器无互联线并联控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2007.
- KAN Jiarong. Research on the parallel single-phase inverters without control interconnection[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [23] IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of PhotoVoltaic (PV) systems[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000.
- [24] 吴志, 顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11):57-61.

WU Zhi, GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11):57-61.

作者简介:

阚加荣(1979-), 男, 江苏盐城人, 讲师, 硕士, 研究方向为逆变器控制策略(E-mail: kanjr@163.com);

谢少军(1968-), 男, 湖北天门人, 教授, 博士研究生导师, 从事功率电子变换技术和航空电源系统的研究;

过亮(1983-), 男, 江苏无锡人, 硕士, 研究方向为逆变器并网和风力发电控制技术。

Unified control strategy of multiple grid-connected inverters for grid-connected/parallel operation

KAN Jiarong¹, XIE Shaojun², GUO Liang³

(1. Electrical Engineering College, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Nanjing Automation Research Institute/NARI Group Corp., Nanjing 210003, China)

Abstract: The multiple grid-connected inverter system is analyzed and its equivalent circuit is obtained. It is deduced that, the output active power and output reactive power of grid-connected inverter can be regulated by adjusting the phase and amplitude of its output voltage respectively, based on which, a unified control strategy is proposed for its grid-connected and parallel operating modes, which applies the active power loop and reactive power loop to respectively regulate the frequency and amplitude of inverter output voltage. The system operating procedure is given and its inherent anti-islanding ability is analyzed. The simulation and experimental results show that the inverter system with the proposed unified control strategy has better control effectiveness in either grid-connected or parallel operating mode, which allows the smooth transition between two operating modes.

Key words: grid-connection; parallel mode; electric inverters; indirect current control; active power; reactive power; unified control; anti-islanding

(上接第 74 页 continued from page 74)

Segmental acquisition of partial discharge UHF pulses and its phase angle calculation

HU Yue¹, SI Liangqi¹, ZHANG Weidong², QIAN Yong¹, SHENG Gehao¹, JIANG Xiuchen¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of

Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shandong Weihai Power Supply Company, Weihai 264200, China)

Abstract: As the cost of partial discharge detection by continuous sampling is high, a method by segmental acquisition is proposed, which uses the partial discharge pulse to simultaneously trigger the power frequency signal while applies both high- and low-speed systems to acquire the UHF (Ultra High Frequency) pulse signal of partial discharge and the power frequency signal respectively. The fuzzy clustering method is applied to calculate the real-time fundamental power frequency and the Fourier series algorithm is applied to calculate the initial phase angle of power frequency signal, which is taken as the phase angle of partial discharge pulse. The phase angle of the whole partial discharge chain is then calculated with the phase angle and time interval of partial discharge pulse and the fundamental power frequency. Results of simulation and field test show the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: insulation; partial discharge; ultra high frequency; Fourier series; fuzzy clustering; trigger circuits; computer simulation; clustering algorithms; sampling