

功率均分控制下并联逆变器功率检测方法研究*

王兴贵, 李 婧, 李晓英
(兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对“功率均分方式控制的逆变器并联系统在轻载运行时,受到传感器精度的影响,系统无法准确检测出功率,从而影响并联控制性能”的问题,将以滤波电感电流代替输出电流检测功率的方法应用到功率均分控制方法中。首先对采用传统的功率检测和采用电感电流进行功率检测的方法时传感器精度对采样电流的影响进行了对比分析,然后针对采用电感电流进行功率检测方法对功率均分控制的影响进行了讨论;最后在Matlab仿真平台上对功率均分控制下使用两种采样方法得到的功率检测效果进行了仿真对比。研究结果表明,在系统额定运行时,分别采样电感电流和输出电流并进行功率检测时,两种检测方法对系统电压调节的效果基本相同;在系统轻载运行时,用电感电流代替输出电流进行功率检测可以降低传感器精度对控制方法的影响,改善对系统环流的抑制效果。

关键词: 并联逆变器; 功率检测; 功率均分控制

中图分类号: TM931; TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)09-1100-04

Power detection method of parallel inverter based on power sharing control

WANG Xing-gui, LI Jing, LI Xiao-ying

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problem that the parallel inverter system which based on power sharing control cannot accurately detect the power at light load due to the sensor precision issue which end up impacting on performance of the system, the power detection method was investigated in which the output current is replaced by inductance current. The traditional power detecting method and inductor current power detecting method were compared and analyzed, and the effect of inductor current power detecting method to power sharing control was also discussed. On the Matlab simulation platform, simulate comparing was performed between the detection results of the two sampling methods under the condition of power sharing control. The results indicate that the two detecting methods have same voltage regulation effect to the system when operated at rated load. While at light load, using inductor current power detecting method instead of output current power detecting method could reduce the effect of the sensor precision to the power detection system and improve the inhibition effect of system circulation.

Key words: parallel inverter; power detection; power sharing control

0 引 言

目前,在电力电子、电力传动和电力系统等领域,研究者通常采用逆变器并联的方式提高逆变器的容量。逆变器并联时,为了抑制系统环流,研究者必须通过并联控制策略,使逆变器的输出电压幅值相等、频率相同、相位一致^[1-2]。在逆变器的并联方案中,分

散逻辑控制和无互联线控制可实现并联系统的冗余性,因此成为并联逆变器的主要控制方案^[3-4]。这两种方案均要求快速、准确地检测出各逆变模块的输出功率^[5-6]。功率需要通过检测电压、电流间接得到。当系统轻载运行时,逆变单元输出电流较小,系统受到传感器精度的影响,不能准确检测逆变单元的输出功率。

本研究分析以逆变器滤波电感电流代替输出电

收稿日期: 2012-04-05

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(1014RJ2A031)

作者简介: 王兴贵(1963-),男,甘肃甘谷人,教授,博士生导师,主要从事电力电子技术、电力系统自动化、控制理论与控制工程方面的研究。E-mail: zixin-lijing@163.com

流的功率检测方法,并通过仿真验证这种方法的可行性。

1 功率检测

功率均分控制^[7-8]是分散逻辑控制的一种。该方法通过检测各逆变单元的有功和无功,并与逆变单元所应承担的平均功率进行比较,计算出新的给定电压,使各逆变单元的输出电压满足幅值相等、频率相同、相位一致的并联条件,从而达到抑制环流的目的^[9]。功率检测是功率均分控制的基础,直接影响着并联控制策略对系统环流的抑制效果。

功率一般是通过检测电压和电流间接得到的。传统的功率检测方式下,系统所检测的电流为逆变器的输出电流。当系统轻载运行时,逆变器输出的电流很小。受到传感器精度的影响,电流越小,误差越大,对功率检测的影响也越大。

为了减小传感器精度对功率检测的影响,研究者采用电感电流代替输出电流的方式实现功率检测^[10]。

1.1 传感器精度对电流检测的影响

为了讨论两种检测方案下传感器精度对电流检测的影响,本研究以两台逆变器构成的逆变系统作为研究对象进行讨论。两台逆变器并联的电路示意图如图1所示。图中, L_1 、 C_1 、 L_2 、 C_2 分别构成了逆变器1和逆变器2的LC滤波器, Z_o 为并联系统的负载。

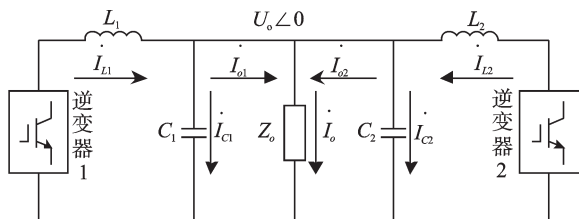


图1 并联逆变器电路示意图

以逆变器1为例,电感电流与输出电流的关系如下:

$$\dot{I}_{L1} = \dot{I}_{o1} + \dot{I}_{C1} \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_{L1}$ —滤波电感电流, $\dot{I}_{C1}$ —滤波电容电流, $\dot{I}_{o1}$ —逆变器的输出电流。

设电流采样的绝对误差为 Δ , 相对误差为 δ , 则有:

$$\delta = \frac{\Delta}{I} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I —所测电流的真值。

则两种采样方法下的相对误差分别为:

$$\begin{cases} \delta_{I_{o1}} = \frac{\Delta}{I_{o1}} \times 100\% \\ \delta_{I_{L1}} = \frac{\Delta}{I_{L1}} \times 100\% \end{cases} \quad (3)$$

当 Z_o 为阻性负载时有:

$$\begin{cases} I_{L1} = \sqrt{I_{C1}^2 + I_{o1}^2} \\ I_{C1} = 2\pi f C U_o \end{cases} \quad (4)$$

本研究设传感器的量程为 6 A, 精度为 0.5%。根据传感器精度的定义, 传感器的最大误差为 0.03 A。本研究设逆变器输出频率为 50 Hz, $U_o = 220$ V, $C_1 = 10 \mu\text{F}$, 负载为 500 Ω 电阻。代入式(4), 则有: $I_{o1} = 0.22$ A, $I_{L1} = 0.72$ A。

将式(4), I_{o1} 、 I_{L1} 的值及最大误差代入式(3), 可得:

$$\begin{cases} \delta_{I_{o1}} = 13.6\% \\ \delta_{I_{L1}} = 4.2\% \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以得出: 传感器的精度对输出电流检测的影响大于对滤波电感电流检测的影响。故研究者采用电感电流代替输出电流的方式进行功率检测, 可以减小传感器精度对功率检测的影响。

1.2 采样电感电流对功率检测的影响

研究者采用电感电流进行功率检测时, 会引入电容的无功分量, 因此需要讨论引入的无功分量对功率检测的影响。按照复功率的定义:

$$\bar{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ \quad (6)$$

令采样电感电流所计算出的复功率为 $\bar{S}'_i$, 由图1和式(6)可以得到:

$$\bar{S}'_i = \dot{U}_o \dot{I}_{Li}^* = \dot{U}_o \dot{I}_{oi}^* + \dot{U}_o \dot{I}_{Ci}^* = \bar{S}_i + \bar{S}_{Ci} = P_i + jQ_i + jQ_{Ci} \quad (7)$$

式中: $\bar{S}_i$ —第 i 个逆变器的复功率, $\bar{S}_{Ci}$ —第 i 个逆变器滤波电容的复功率。

通过式(7)可以看出, 与传统的功率检测方法相比, 采用电感电流计算功率仅多出了滤波电容所消耗的无功功率分量。因此, 在讨论上述方法对功率检测的影响时, 只需考虑滤波电容的无功分量对计算无功功率调节量的影响。笔者定义 ΔQ_i 为第 i 台逆变器的无功功率调节量, 则有:

$$\Delta Q_i = Q_i - \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (8)$$

根据式(8), 可以得到:

$$\begin{aligned} \Delta Q'_i &= Q'_i - \frac{Q_1 + Q_2}{2} = Q_i + Q_{Ci} - \frac{Q_1 + Q_{C1} + Q_2 + Q_{C2}}{2} = \\ &= \Delta Q_i + Q_{Ci} - \frac{Q_{C1} + Q_{C2}}{2} = \Delta Q_i + \delta_{Ci} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: Q'_i , $\Delta Q'_i$ —引入电容无功分量后第 i 台逆变器的无功功率及无功调节量; δ_{Ci} —第 i 台逆变器中滤波

电容的无功功率的调节量。

其中,第 i 台逆变器的滤波电容无功功率为:

$$Q_{Ci} = -\frac{1}{2}\omega C_i U_o^2 \quad (10)$$

从式(10)可以得出,引起各滤波电容上吸收的无功功率不相等的主要因素是滤波电容的参数。研究者在选用滤波电容时,可选用同型号的电容。此时,即使器件差异会造成每个滤波电容吸收无功功率不同,但由于电容通常很小,这种差异可以忽略不计。此时, $\delta_{Ci} \approx 0$, 则:

$$\Delta Q_i \approx \Delta Q_i \quad (11)$$

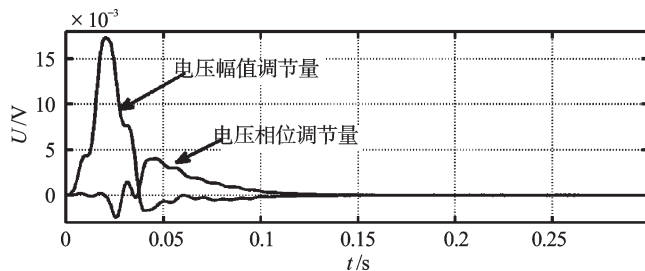
通过上述分析可知,逆变器并联系统采用功率均分控制策略对系统进行控制时,逆变器的输出功率可以近似由逆变器的输出电压与滤波电感电流计算得到。

2 仿真结果与分析

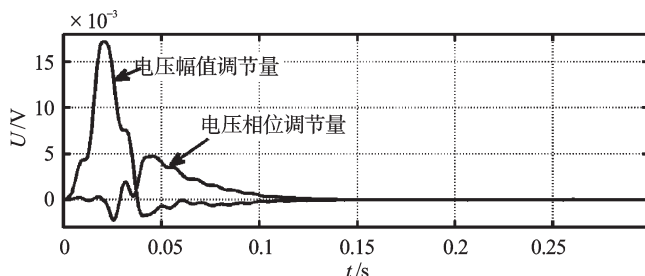
为了验证上述方案的正确性,本研究在 Matlab 软件的 Simulink 环境下搭建了由两台单相逆变器构成的并联系统模型,并对其进行了仿真。

每台逆变器均采用单极性的 SPWM 进行调制,调制比为 0.8,调制波频率为 50 Hz。逆变器的参数如下:逆变器直流侧电压 $U_d = 400$ V,滤波电感为 $L_1 = 10$ mH, $L_2 = 11$ mH,滤波电容为 $C_1 = 10$ μ F, $C_2 = 9.4$ μ F。本研究分别对负载为 100 Ω 电阻和 500 Ω 电阻的两种情况进行仿真,并对上述功率检测方法进行分析及验证。

系统带 100 Ω 电阻负载时,两种功率检测方法下的电压调节量波形如图 2 所示。



(a) 采样输出电流时的电压调节量



(b) 采样电感电流时的电压调节量

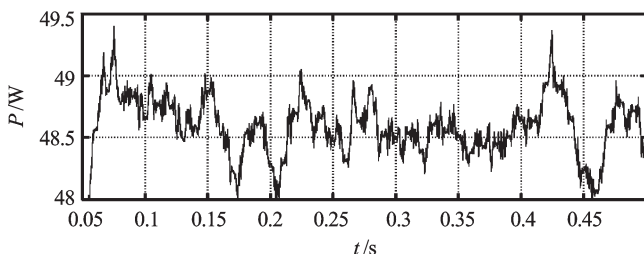
图2 系统负载为 100 Ω 电阻时的电压调节量

将图 2(a)、图 2(b) 进行比较可知,研究者分别采样两种不同的电流进行功率检测,二者对系统的电压调节的效果基本相同。

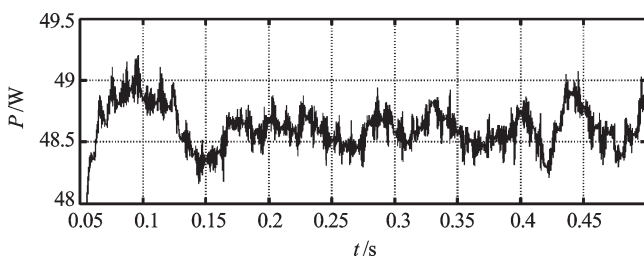
仿真中所用功率检测模块的功率检测时间为一个基波周期。受到功率检测时间的影响,电压调节量在前 0.04 s 发生振荡;0.04 s 之后,在功率均分控制的作用下,系统的环流逐步得到抑制;此时,电压调节量也随之减小;直至 0.14 s,电压调节量趋近于零。

经进一步比较可以发现,电容无功分量的引入,对控制系统计算电压相位调节量略有影响。具体表现为在 0.04 s~0.05 s 之间,采样输出电流计算出的相位调节量比采样电感电流时的电压调节量小。但相位调节量在此处的差异最终未对系统环流的抑制作用造成影响。

系统带 500 Ω 的电阻负载时,两种功率检测方法下检测的有功功率如图 3 所示。



(a) 采样输出电流时的有功功率



(b) 采样电感电流时的有功功率

图3 系统负载为 500 Ω 电阻时单台逆变器的有功功率

此时,为了仿真传感器的精度对功率检测的影响,并比较在此影响下两种采样电流对系统环流的抑制效果,本研究将一随机变量引入两种采样电流中,并将其最大值设置为 0.03。

此时系统直流侧电压为 400 V,调制比为 0.8。经过计算,单台逆变器的输出功率为 48.67 W。由图 3(a) 看出,由于此时采样的输出电流绝对误差大,系统的有功功率在 48 W~49.4 W 之间振荡,振荡幅值较大。而图 3(b) 采用电感电流计算的有功功率在 48.3 W~49.2 W 之间振荡,接近 48.67 W 的理论值,受传感器精度的影响比前者小。

系统所带负载的阻值为 500 Ω 时,两种检测方法下的系统环流如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在采样电感电流进行控制时,系统环流的抑制效果要优于

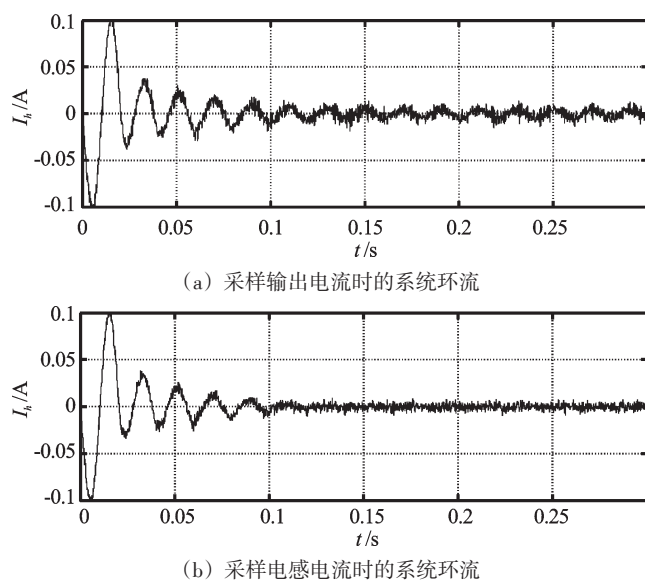


图4 系统负载为500 Ω电阻时系统环流

采样输出电流时的系统对环流的抑制效果。

3 结束语

笔者研究了一种以滤波电感电流代替输出电流计算功率调节量的方法。仿真及研究结果表明,采用该方法对系统轻载运行时的功率进行检测可以减小传感器精度的影响。同时,该方法虽然在功率检测时引入了滤波电容的无功分量,但在功率均分控制下,系统所受该无功分量的影响较小。系统额定运行时,两种采样方法对系统的控制效果基本相同;在系统轻载或空载运行时,系统环流的抑制效果要优于采样输出电流时的系统对环流的抑制效果。

参考文献(References):

- [1] 陈良亮. 无输出隔离变压器的逆变器并联系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院,2009:15-17.
- [2] SUN X, LEE Y S, XU D H. 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.
- [3] 姜桂宾, 裴云庆, 杨旭, 等. SPWM逆变电源的无互联系号线并联技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 94-98.
- [4] TULADHAR A, JIN H, UNGER T, et al. Control of parallel inverters in distributed ac power system with consideration of line impedance effect[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2000, 36(1): 131-137.
- [5] TAKAO K, SHIGENOR H. Parallel operation of voltage source inverters [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1988, 24(2): 281-287.
- [6] 肖岚, 胡文斌, 蒋渭忠, 等. 基于主从控制的逆变器并联系统研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2002, 32(1): 133-137.
- [7] 肖岚, 陈良亮, 李睿, 等. 基于有功和无功环流控制的DC-AC逆变器并联系统分析与实现[J]. 电工技术学报, 2005, 20(10): 7-12.
- [8] HOLTZ J, WEMER K H. Multi-inverter UPS system with redundant load sharing control[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1990, 37(6): 506-513.
- [9] 汪洪亮, 岳秀梅, 裴雪军, 等. 逆变器并联系统的新功率算法及实现[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 37-43.
- [10] 于玮. UPS并联系统若干关键问题研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院, 2009: 63-64.

[编辑:李辉]

(上接第1084页)

- [7] Siemens PTL. PSS/E Model Library of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA, 2009.
- [8] Siemens PTL. Program Application Guide of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA, 2009.
- [9] 徐琼璟, 徐政. PSS/E中的风电机组通用模型概述[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 176-182.
- [10] CIGRE Working Group C4. 601. Modeling and dynamic behavior of wind generation as it relates to power system control and dynamic performance [R]. Paris, France: CIGRE Working Group C4. 601, 2007.
- [11] CLARK K, MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J. Modeling of GE-Wind Turbine-Generators for Grid Studies [R]. NY, USA: General Electric International, Inc., 2008.
- [12] MILLER N W, SANCHEZ-GASCA J J, PRICE W W, et al. Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 MW Wind Turbine-

generators for Stability Simulations [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Ontario: [s.n.], 2003.

- [13] PRICE W W, SANCHEZ-GASCA J J. Simplified Wind Turbine Generator Aerodynamic Models for Transient Stability Studies [C]. Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, USA: [s.n.], 2006.
- [14] 关宏亮, 赵海翔. 风电机组低电压穿越功能及其应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 173-177.
- [15] SEYEDI M. Evaluation of the DFIG Wind Turbine Built-in Model in PSS/E [D]. Göteborg, Sweden: Division of Electric Power Engineering, Department of Environment and Energy, Chalmers University of Technology, 2009.

[编辑:李辉]