

一种基于耦合电感的逆变器并联系统环流抑制方法^{*}

陈良亮 肖岚 胡文斌 严仰光

南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室 (南京 210016)

摘要:逆变器并联系统各模块输出电压的幅值和相位等参数不一致会在各模块间产生较大的环流。在逆变器输出端串联电感能够较好的抑制并联逆变器模块间环流,其缺点是降低了并联系统的稳态电压精度。针对上述问题,本文提出了耦合电感法这一新的环流抑制方法,分析了多台逆变器并联时耦合电感的连接方法,研究了逆变器并联系统单模块后接耦合电感和非耦合电感对系统输出电压和环流的影响。实验结果证明,耦合电感抑制环流的效果优于普通电感,且耦合电感不影响逆变器并联系统的稳压精度。

关键词:耦合电感, 逆变器, 并联, 环流

0 引言

随着我国国民经济和信息技术的发展,对电源变换系统(如 UPS)的容量、性能和可靠性要求越来越高。在电力电子领域,多模块并联实现大容量电源被公认为是电源技术发展的方向^[1-2]。采用逆变器并联控制技术,由多模块并联分担负载,降低功率开关管的电流应力,实现多余度供电,是提高逆变器可靠性的重要方法。此外,逆变器并联系统的模块化设计使系统的结构灵活,有利于扩展容量,缩短研制周期和降低成本^[3]。在通常的无输出隔离变压器的逆变器并联系统中,各模块输出电压的幅值和相位等参数的较小差别都会在各模块间产生较大的环流,使逆变器各模块不能均分负载。在并联逆变器各模块输出电压端串联环流抑制电感是解决这个问题的一种重要方法^[4-5]。但是普通电感在抑制环流的同时,电感上的压降降低了并联系统的稳态电压精度。本文提出一种新的利用耦合电感抑制环流的方法,分析了多台逆变器并联时耦合电感的连接方法,研究了逆变器并联系统后接耦合电感和非耦合电感对系统输出电压和环流的影响,最后讨论了耦合电感的设计原则。试验结果证明耦合电感不但可以很好的抑制环流,而且不影响并联系统的稳态电压精度。

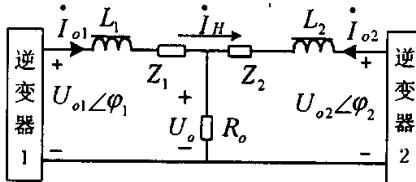


图 1 双机并联系统原理图

1 环流抑制电感在逆变器并联系统中的

作用分析

为便于分析,以两台逆变器并联为例,其原理如图 1 所示。图中, Z_1, Z_2 为逆变器等效输出阻抗。 L_1, L_2 为环流抑制电感, R_o 为负载电阻, $U_{o1} < \varphi_1$, $U_{o2} < \varphi_2$ 及 U_o 为两路逆变器空载输出电压和并联汇流条电压。假设 $Z_1 = Z_2 = Z$, $L_1 = L_2 = L$, 两台逆变器输出电压的幅值、相位等参数不一致时,会产生不流经负载的环流。不加环流抑制电感时环流的大小为:

$$I_H = \frac{I_{o1} - I_{o2}}{2} = \frac{U_{o1} - U_{o2}}{2Z} \quad (1)$$

由于逆变器等效输出阻抗 Z 的值很小,由(1)式可知,两路逆变器输出电压在幅值和相位上的较小差别都会产生较大的环流。加入环流抑制电感 L_1 和 L_2 以后,环流大小为:

$$I_H = \frac{I_{o1} - I_{o2}}{2} = \frac{U_{o1} - U_{o2}}{2(Z + j\omega L)} \quad (2)$$

通常取 $j\omega L > Z$,由(2)式可见环流抑制电感的引入使并联系统模块间的环流大为减小。环流抑制电感可以有效的抑制逆变器并联系统动、静态调节过程中出现的环流。

逆变器并联系统各模块的输出电压反馈点应接到各模块的输出端而不是公共负载端,否则并联系统不能正常工作^[5]。各模块的输出电压反馈保证了各模块输出电压不变,但环流抑制电感上的压降降低了并联汇流条上的稳态电压。文献[5]提出了一种相位反馈补偿的方法来提高系统的稳压精度,这种方法比较复杂,降低了系统的可靠性。

2 耦合电感在并联系统中的应用

并联逆变器各模块输出端直接串联电感的方法可以抑制环流,但这种方法降低了并联系统的稳态电压精度。利用电感之间的耦合作用不但可以更好的抑制环流,还可以消除电感对并

* 基金项目:中国航空科学基金(编号:01F52032)资助项目

联系系统稳态电压精度的影响。 $n(n \geq 2)$ 台逆变器并联的原理如

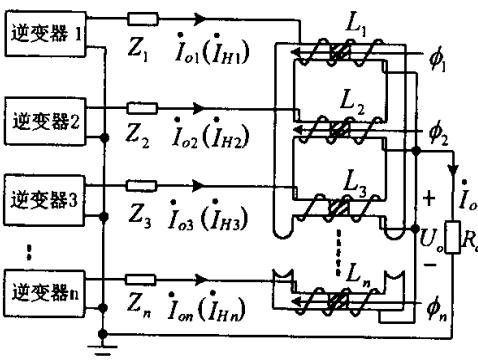


图2 并联系统耦合电感连接示意图

图2所示。设输出阻抗 $Z_1 = Z_2 = \Delta = Z_n = Z$, 电感匝数 $W_1 = W_2 = \Delta = W_n = W$, 电感值 $L_1 = \Delta = L_n = L$, 为防止电感饱和, 每个电感均有气隙。由于铁芯磁阻相对气隙磁阻可以忽略不计, 若各电感间紧密耦合, 则任意两个电感 L_i 与 L_j 之间的互感表达式为:

$$M_{ij} = M_{ji} = \frac{L}{n-1} (1 \leq i, j \leq n) \quad (3)$$

当逆变器并联系统各模块输出电压的相位和幅值不相同时, 各模块间存在有功和无功环流。设 $I_{oi}, I_{o2}, \dots, I_{on}$ 分别为各模块输出电流, I_o 为总的负载电流, 其参考方向如图2所示。定义 I_{hi} , I_{h2}, \dots, I_{hn} 为并联系统模块间的环流, 其值为各模块输出电流与单模块平均输出负载电流之差, 则有:

$$I_{oi} = I_o/n + I_{hi} (1 \leq i \leq n) \quad (4)$$

由于环流只在逆变器并联系统各模块之间流动, 由基尔霍夫电流定理可得:

$$\sum_{i=1}^n I_{hi} = 0 \quad (5)$$

设逆变器并联系统各模块输出电压为 U_{oi} ($1 \leq i \leq n$), 并联汇流条电压为 U_o , 由基尔霍夫电压定理可得方程组:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_{o1} - \dot{U}_o = (Z_1 + j\omega L_1) \dot{I}_{o1} - j\omega M_{1,2} \dot{I}_{o2} - \dots - j\omega M_{1,n} \dot{I}_{on} \\ \dot{U}_{o2} - \dot{U}_o = (Z_2 + j\omega L_2) \dot{I}_{o2} - j\omega M_{2,1} \dot{I}_{o1} - \dots - j\omega M_{2,n} \dot{I}_{on} \\ \dots \\ \dot{U}_{on} - \dot{U}_o = (Z_n + j\omega L_n) \dot{I}_{on} - j\omega M_{n,1} \dot{I}_{o1} - \dots - j\omega M_{n,n-1} \dot{I}_{on-1} \end{array} \right. \quad (6)$$

联立(5)式, 解方程组(6)可得:

$$I_{hi} = (n-1) * \frac{(n-1) \dot{U}_o - \sum_{j=1}^n \dot{U}_{oj}}{n[j\omega L + (n-1)Z]} (j \neq i) \quad (7)$$

$$U_o = \frac{R_o \sum_{j=1}^n \dot{U}_{oj}}{nR_o + Z} \quad (8)$$

上式的结果说明, 用耦合电感抑制环流时, 逆变器并联汇流条电压与各模块输出电压、输出阻抗和负载有关而与耦合电感的感值无关, 因此耦合电感不影响并联系统汇流条的稳态电压精度。

如果并联逆变器各模块环流抑制电感不耦合, 即:

$$M_{ij} = M_{ji} = 0 (1 \leq i, j \leq n) \quad (9)$$

将式(9)代入方程组(6), 得到电感不耦合时环流和并联汇流条电压表达式:

$$I_{hi} = \frac{(n-1) \dot{U}_o - \sum_{j=1}^n \dot{U}_{oj}}{n * (Z + j\omega L)} (j \neq i) \quad (10)$$

$$U_o = \frac{R_o \sum_{j=1}^n \dot{U}_{oj}}{nR_o + Z + j\omega L} \quad (11)$$

由(7)式和(10)式的结果, 可得用耦合电感与非耦合电感抑制环流时对应的环流大小的比值为:

$$K_h = \frac{(n-1)(j\omega L + Z)}{n(j\omega L + Z - Z/n)} \approx \frac{n-1}{n} \quad (12)$$

上式的结果说明, 在 n 台逆变器并联时, 使用耦合电感后环流减小为非耦合电感时环流大小的 $(n-1)/n$ 。因此, 要达到相同的环流抑制效果, 使用耦合电感可以减小电感的体积。此外, 比较(8)和(11)式可以看出: 环流抑制电感不耦合时, 并联汇流条的电压与电感的感值和负载等因素有关, 且随着环流抑制电感感值的增加, 输出电压逐渐减小; 电感耦合后, 并联汇流条电压与耦合电感的感值无关。

3 实验结果

实验用的逆变器并联系统由两台逆变器组成, 单个逆变器模块采用逆变器输出电压和滤波电感电流双闭环瞬时反馈控制

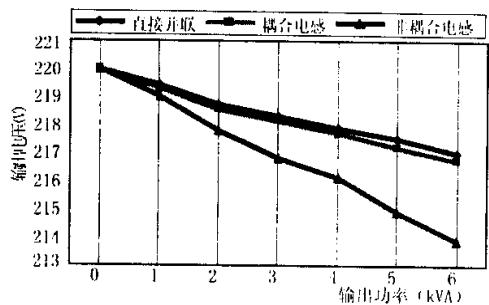


图3 三种情况下的负载特性

技术, 逆变器输出电压实时跟踪基准正弦波, 通过调节两台逆变器输出电压的幅值相位等参数实现逆变器并联。单模块的主要参数如下:

输入电压: $U_{in} = 340VDC$, 输出电压: $U_o = 220V/50Hz$, 功率: $P_o = 3kVA$

环流抑制电感: $L_1 = L_2 = 1.6mH$

逆变器并联系统在直接并联、耦合电感抑制环流、非耦合电感抑制环流时阻性负载下的输出特性如图 3 所示。由图可见, 耦合电感抑制环流时耦合电感上有 0.2V 左右的压降, 主要是由耦合电感的电阻和漏感引起的。非耦合电感对并联汇流条电压的稳压精度有较大影响, 满载时压降达到 6.1V, 必须采取其它措施加以校正。

在负载电阻为 $R_o = 64.6\Omega$ 时, 测得逆变器并联系统单模块存在电压差时两台逆变器直接并联、环流抑制电感不耦合、环流抑制电感耦合时逆变器输出电压 U_{d1} 、 U_{d2} 和输出电流 I_{d1} 、 I_{d2} 的波形分别如图 4(a)、(b)、(c) 所示。

图 4 中逆变器直接并联、非耦合电感抑制环流、耦合电感抑制环流时的环流大小分别为 2.14A、0.68A、0.38A, 可见耦合电感和非耦合电感都对环流有较好的抑制作用。用耦合电感抑制环流时环流减小为非耦合电感时的 55.88%, 考虑到逆变器内阻以及耦合电感漏感的影响, 试验结果同本文的理论分析基本一致。

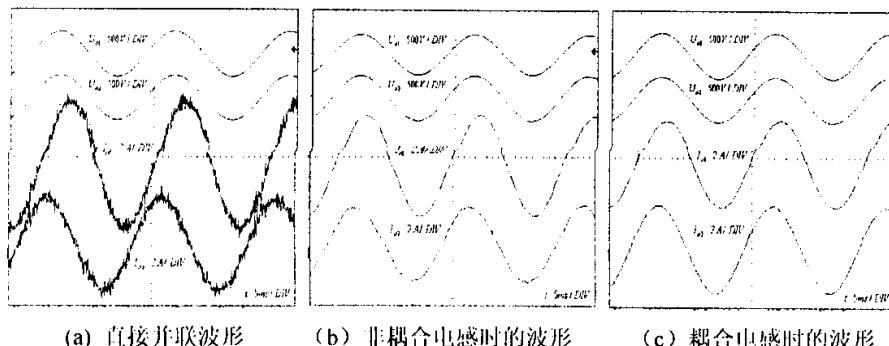


图 4 三种情况下的逆变器并联系统输出电压电流波形

4 结 论

本文详细地研究了非耦合电感和耦合电感对逆变器并联系统环流的抑制作用。由本文的理论分析和实验结果, 可以得出如下结论:

1. 非耦合电感和耦合电感都可以有效抑制逆变器并联系统模块间的环流。
2. 耦合电感抑制环流的能力优于普通电感, 用耦合电感抑制环流可使环流减小为原来的 $(n-1)/n$ 。其中, n 为逆变器并联系统的模块数。
3. 耦合电感不影响逆变器并联系统输出电压的稳态电压精度。

参考文献

- [1] 邢岩. 逆变器并联运行系统的研究[D]:[学位论文]. 南京航空航天大学, 1999
- [2] Jiann-Fuh Chen, Ching-Lung Chu. Combination voltage-controlled and current-controlled PWM inverter for UPS parallel operation [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 10, No. 5, pp.547~558, 1995
- [3] Tokokawababa, Shigenori Higashino. Parallel operation of voltage source inverters[J]. IEEE Trans on IA., 24(2), pp.281~287, 1988
- [4] 肖嵐, 胡文斌, 蒋渭中, 严仰光. 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). Vol. 32, No. 1, pp26-29, 2002
- [5] 刘小四, 熊蕊. 逆变器并联运行时环流的产生及抑制研究[J]. 电力电子技术. 1999, 33(3):pp16-18

作者简介



陈良亮*,男,博士研究生。

肖嵐,女,博士后/副教授。

胡文斌,男,博士研究生。

严仰光,男,教授,博士生导师。