

逆变器共电压调节器并联运行的仿真研究

杨洪深

(合肥工业大学,安徽 合肥 230009)

摘要: 本文分析了共电压调节器逆变器并联运行的系统结构和并联系统的均流原理以及环流特性,最后用 saber 软件对此并联系统进行了仿真分析,验证了该控制方式的可行性。

关键词: 逆变器并联;电压调节器;仿真;环流

中图分类号: TM42

文献标识码: A

文章编号: 1672-0547(2007)01-0076-03

1. 前言

单个电源组件的容量是有限的,为了增加电源的容量,提高供电可靠性,常采用电源并联技术。由于逆变电源通常采用新型全控功率开关器件构成单元模块,受功率开关器件容量的限制,单个逆变电源模块的容量是十分有限的。通过多个模块并联进行扩容,不仅可以充分利用新型全控功率开关器件的优势,减少系统的体积,降低噪声,还可以提高系统的动态响应速度和逆变电源变换器的通用性。然而,交流电源间的并联运行远比直流电源并联运行复杂,它不但要求两电源输出电压幅值相等,而且要求其频率与相位严格一致。为了使各并联模块可靠地工作,最重要的是解决均流问题。共电压调节器的逆变器并联系统能够起到很好的均流作用,本文将通过仿真分析该系统的均流效果从而验证了它的可行性。

2. 并联系统的结构

共一个电压调节器的逆变器并联系统的组成如图 1 所示:

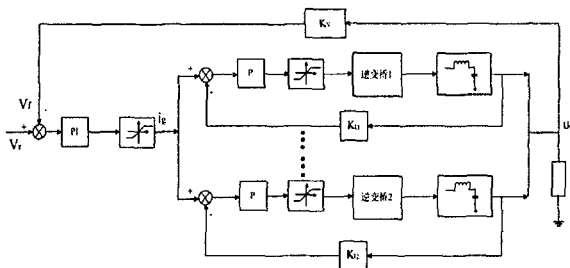


图 1 共电压调节器的逆变器并联系统框图

从图中可以看出该并联系统由一个电压控制环和 \$N\$ 个电流跟随器组成。电压控制环作为外环用来调节逆变器并联系统的输出电压,使之跟随给定参考电压,它的输出信号 \$i_g\$ 作为各电流模块的输入信号。各电流模块是由电感电流跟随器组成。因为各电流模块跟随同一个电流给定,所以它们的输出电流相同,故能实现均流。同时电压调节器和电流调节器的输出端都设有限幅环节对系统的安全加以保护。

3. 共电压调节器并联系统均流原理

以两模块并联系统为例分析各模块的输出特性。逆变器并联系统输出连接线表现为阻性,设阻值为 \$r_1, r_2; L_1, L_2, C_1, C_2\$ 分别为两逆变器的滤波电感和电容, \$U_1, U_2\$ 为两逆变器的输出电压, \$R_L\$ 为负载阻抗(可以为阻性、容性或感性)。该系统输出级的等效电路如图 2 所示:

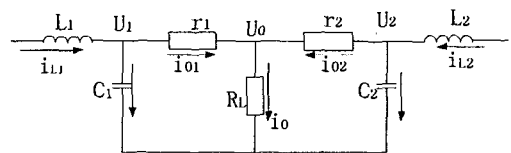


图 2 共电压调节器并联系统输出等效电路

稳态工作时,设输出电压 \$U_1, U_2\$ 为标准正弦波,则有如下方程:

$$\begin{cases} \dot{I}_{i1} = \dot{U}_1 \cdot j\omega C_1 + \dot{I}_{o1} = K_{i1} \dot{I}_g \\ \dot{I}_{i2} = \dot{U}_2 \cdot j\omega C_2 + \dot{I}_{o2} = K_{i2} \dot{I}_g \\ \dot{U}_1 = \dot{U}_0 + r_1 \dot{I}_{o1} \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_0 + r_2 \dot{I}_{o2} \\ \dot{I}_0 = \dot{I}_{o1} + \dot{I}_{o2} \end{cases} \quad (1)$$

将上式变换可得:

$$\begin{cases} \dot{I}_{o1} = \frac{K_{i1} \dot{I}_g - \dot{U}_0 \cdot j\omega C_1}{1 + r_1} \\ \dot{I}_{o2} = \frac{K_{i2} \dot{I}_g - \dot{U}_0 \cdot j\omega C_2}{1 + r_2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \dot{I}_{o1} + \dot{I}_{o2} = \dot{I}_0 \quad (3)$$

当两逆变器容量相同,且 \$K_{i1}=K_{i2}=K, r_1=r_2=r, C_1=C_2=C\$, 由以上两式可得:

$$\dot{I}_{o1} = \dot{I}_{o2} = \frac{K \dot{I}_g - \dot{U}_0 \cdot j\omega C}{1 + r} = \frac{\dot{I}_0}{2} \quad (4)$$

对逆变器并联系统而言, \$r_1 \ll j\omega C_1, r_2 \ll j\omega C_2\$, 则(2)式可简化为:

收稿日期: 2006-11-03

作者简介: 杨洪深(1968-),男,安徽全椒人,铜陵学院电气工程系教师,合肥工业大学硕士研究生,研究方向:电力电子及电力传动。

$$\begin{cases} \dot{I}_{o1} = K_{f1} \dot{I}_g - \dot{U}_0 \cdot j\omega C_1 \\ \dot{I}_{o2} = K_{f2} \dot{I}_g - \dot{U}_0 \cdot j\omega C_2 \end{cases} \quad (5)$$

环流为:

$$\dot{I}_H = \frac{\dot{I}_{o1} - \dot{I}_{o2}}{2} = \frac{\dot{I}_g}{2} (K_{f1} - K_{f2}) - \frac{\dot{U}_0}{2} (j\omega C_1 - j\omega C_2) \quad (6)$$

从式(6)可以看出两台逆变模块间的环流有两个分量构成:一个分量是由于两逆变模块的电流放大倍数之差而引起的环流;另一分量是由于两台逆变模块的输出滤波电容的差异而引起的环流。

综上所述,在共用一个电压调节器的多电流模块并联系统中欲减少各电流模块的环流,使各模块均分负载电流,必须减小各逆变模块的电流反馈环节,输出滤波环节的参数差异,即使 $\Delta K \rightarrow 0, \Delta C \rightarrow 0$ 。

4. 共电压调节器并联系统仿真分析

共电压调节器并联系统各并联模块的给定基准相同,对由基准差异引起的环流有抑制作用。这时产生环流的主要因素是滤波电容和电流环反馈系数的差异。

4.1 滤波参数与环流的关系

分别对 $C_1=35\mu F, C_2=10\mu F$ 和 $L_1=3mH, L_2=1mH$ 两种情况时的输出电压、电感电流、输出电流进行仿真,波形如图3、图4所示:

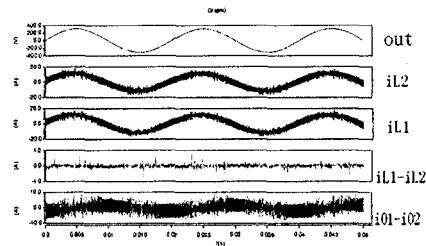


图3 滤波电容与环流的关系仿真波形

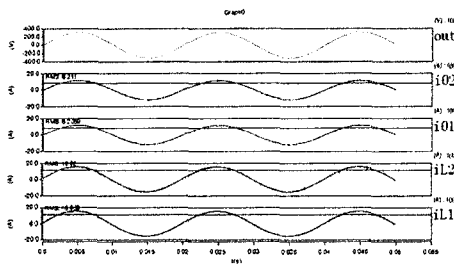


图4 滤波电感与环流的关系仿真波形

由波形看出:当电容差别较大时,两逆变器的输出电流的差($i_{O1}-i_{O2}$)比较大,这说明滤波电容的差异会引起负载电流的不均分,产生环流;当两组逆变器的滤波电感不同时,两电感电流因为电流内环的调节而跟随同一给定,在电流调节器的放大倍数足够大、跟随效果良好时,数值几乎相等,说明滤波电感的差异不会在两组逆变器之间形成环流。

4.2 电流反馈系数与环流的关系

各并联模块的电感电流跟随同一给定,当电流反馈系数不同时,电感电流必然不等,从而形成环流。图5是反馈系数分别为1和0.9时两逆变器的输出电流和环流的仿真波形。

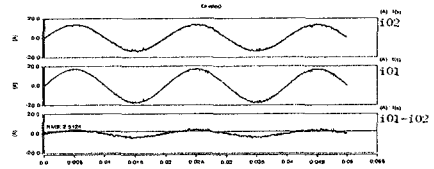


图5 电流环检测系数有差时的环流波形

图示的输出电流差约2.5A,可见电流反馈系数有差时产生的环流量很大,即电流反馈系数对并联逆变器的均流性能影响显著。

4.3 谐波环流的产生及抑制

图6是滤波电容和电流反馈系数均无差时的输出电流差的波形,可以看出基本无环流,值得指出的是这里的无环流是指基波无环流,但还有一定的谐波环流,以下是对谐波环流的分析。先看单台逆变器带负载时的谐波电流情况,如图7所示:

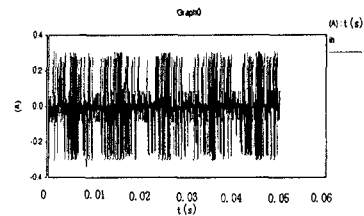


图6 电容和电流反馈系数均无差时环流波形

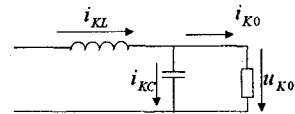


图7 谐波环流示意图

电感电流相当于一电流源,设第K次谐波电流为

$$i_{KL} = I_{KL} \sin(K\omega t), \text{ 容易计算出输出谐波电流 } \dot{I}_{K0} = \frac{1}{1 + jK\omega C Z} \dot{I}_{KL}$$

$$\text{当 } Z = R \text{ 时, } I_{K0} = \frac{1}{\sqrt{1 + (K\omega CR)^2}} I_{KL}; \quad (7)$$

$$\text{当 } Z = R + jK\omega L \text{ 时, } I_{K0} = \frac{1}{\sqrt{(K^2 \omega^2 CL^2 - 1)^2 + (K\omega CR)^2}} I_{KL}; \quad (8)$$

$$\text{当 } Z = R - j \frac{1}{K\omega C} \text{ 时, } I_{K0} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \frac{C}{C'})^2 + (K\omega CR)^2}} I_{KL}. \quad (9)$$

从上式可以看出,在负载一定的情况下,逆变器输出的第K次谐波电流与电感电流的第K次谐波电流幅值和滤波电容的大小有关。当两台逆变器并联时,逆变器之间的第K次谐波电流最大为单台逆变器输出的第K次谐波电流的2倍。所有各次谐波环流叠加在一起形成了如图6所示的谐波环流波形。因此,要抑制并联逆变器之间的谐波环流,可采取以下措施:

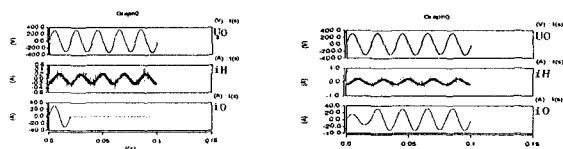
- (1) 在不至于使单台逆变器调制失败的前提下,尽可能增大滤波电感,以减小电感电流的谐波;
- (2) 适当增大每台逆变器的滤波电容;
- (3) 由于逆变器输出的谐波电流的频率远比基波频率高,因此可考虑在各逆变器的输出端串联一较小的电感,此电感能有效地滤除谐波电流,而又不至于对基波电流产生较

大的阻抗作用,不足以影响负载电压的稳压精度。

4.4 系统动态响应仿真

4.4.1 加载或减载的动态响应

图8(a)是由满载突变为空载,这时输出电压U₀略有增加,输出电流i₀很快下降为零,环流i_H基本不变。图8(b)是由半载突变为满载,这时输出电压略有减小,输出电流很快变达到新的稳定状态,环流也基本不变。这表明共电压调节器并联系统负载切换时具有很好的动态响应性能,且负载电流变化时环流变化不大,既环流与负载无关。



(a) 满载到空载 (b) 半载到满载

图8 共电压调节器并联系统负载变化时的波形

4.4.2 逆变器加入和退出的动态响应

设原来只有一台逆变器A工作,现在并入逆变器B,由于负载的作用,带负载逆变器A和空载逆变器B的输出电压的幅值和相位都有差值,所以当逆变器B并入A时,对系统会有冲击。下面定性分析并联时对系统的影响:

逆变器并联的目的之一就是为了让负载获得幅值比较稳定的输出电压,如果逆变器A带的负载过重,以至于使输出电压降低到规定值(这一点由控制器事先设定)时,这时控制器会要求逆变器B并入。并入瞬间,逆变器A和B的输出电压幅值之差不会很大。由于两逆变器共用同一个电压调节器,它们有共同的电流参考信号,所以逆变器A和B的调制波的基波的相位相同,不妨假设调制波的基波分别为

$$u_{Am} = U_A \sin \omega t, \quad u_{Bm} = U_B \sin \omega t$$

逆变器B空载,它的LC输出滤波器的频率特性为:

$$G_B(j\omega) = \frac{1}{1 - L_B C \omega^2} \quad (10)$$

显然,逆变器B的输出滤波器对调制波的基波无滞后作用。

逆变器A带阻性负载,它的LC输出滤波器的频率特性为:

$$G_A(j\omega) = \frac{1}{1 - L_A C \omega^2 + j \frac{L_A}{R_L} \omega} \quad (11)$$

由上式可知,逆变器A的输出电压的相位比调制波的基波

$$\text{的相位滞后了 } \arctan \frac{\omega}{R_L (\frac{1}{L_A} - C \omega^2)}$$

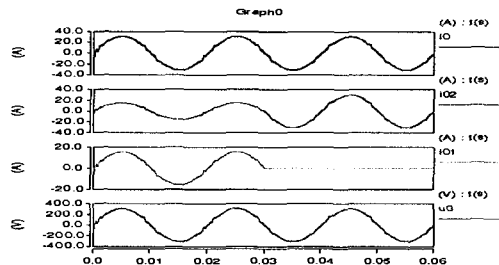
所以并联时逆变器A和B输出电压的相位差为:

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{\omega}{R_L (\frac{1}{L_A} - C \omega^2)}$$

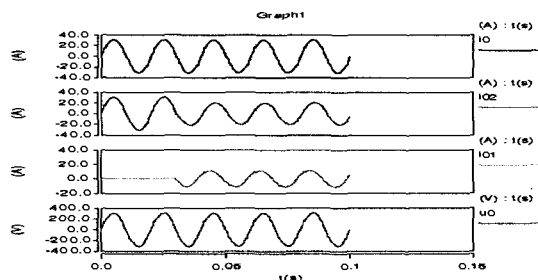
通常输出滤波器的电感为毫亨级,电容为微法级,故上式的 $\Delta\varphi$ 很小。也就是说,并联瞬间,逆变器A、B输出电压的相位差不会太大。所以切换时负载电压存在短暂的波动,但系统很快便进入稳态,输出电压稳定。

图9(a)是两台逆变器并联满载运行情况下,突然将一台逆变器退出时的电流、电压动态仿真波形。一台退出后负载电压和负载电流基本不变,只是另外一台逆变器须承担全

部负载电流,因而其输出电流增加了一倍。图9(b)是一台逆变器单独满载运行情况下,突然将另外一台逆变器加入时的电流、电压动态仿真波形,这时的情况和前者相反,负载电压和负载电流仍变化不大,但负载电流由两台逆变器均分,并且可以看出系统在切换时具有很好的动态性能。



(a) 一台退出的电压电流波形



(b) 一台加入的电压电流波形

图9 一台逆变器加入和退出的仿真波形

5. 小结

通过对逆变器模块中各参数变化对环流影响的仿真分析,表明共电压调节器并联系统各并联模块的给定基准相同,对由基准差异引起的环流有抑制作用,这消除了产生环流的主要因素,这时滤波电容和电流环反馈系数的差异成为主要因素。共电压调节器并联运行系统对参数一致性要求较高,特别是电感电流反馈系数,这是它的局限性。另外通过对系统的动态响应性能做了仿真分析,表明系统在切换时动态过程迅速。在电压调节方面,共电压调节器并联运行系统的输出电压跟随同一电源给定,输出电压一致性好,但同时增加了两台逆变器之间的互连线,限制了远程并联功能。

参考文献:

- [1]黄 蕾. 并联逆变器控制技术的研究[D]. 南京航空航天大学硕士学位论文,2004.
- [2]肖 岚. 单相及三相软开关航空静止变频器的研究[D]. 南京航空航天大学博士学位论文,1998.
- [3]李爱文,张承慧. 现代逆变技术及其应[M]. 北京: 科学出版社,2000.
- [4]陈道炼. DC-AC 逆变技术及其应[M]. 北京: 机械工业出版社,2003.
- [5]王欣亚等. 逆变器并联运行技术[C]. 北京: 第十三届全国电源技术年会论文集.
- [6]SLuo, ZYe, R - Lin, F.Lee, A classification and evaluation of paralleling method for power supply modules [C]. IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Proc.1999.