

逆变器电容和电感电流反馈方式的比较研究

叶楠 何中一 孟宪会 邢岩

(南京航空航天大学航空电源重点实验室 210016)

摘要 研究了以电容电流作为反馈量的逆变器电流滞环控制方法, 提出实现电路, 并从理论、仿真和实验的角度与传统的电感电流反馈方式作比较。研究表明, 采用电容电流反馈控制方式, 可以使逆变系统的输出电压波形及负载特性得以有效改善。

关键词 逆变器 控制 电流反馈

1 引言

逆变电源广泛应用于民用和航空航天等领域。为了满足输出电压波形质量好、动态响应快等要求, 目前逆变器通常采用双环或多环反馈控制, 比较典型的是采用输出滤波电感电流和输出电压反馈构成的电流型控制逆变器^[1]。电压外环的调节器一般为PI形式, 其输出作为电流内环的给定; 电流内环则设计为电流跟随器形式^[2,3]。

逆变电源中常见的电流跟随控制技术主要有电流滞环瞬时值控制技术和电流SPWM瞬时值控制技术等^[2]。由于电流滞环瞬时值控制技术具有控制电路简单、性能优越等特点, 得到了普遍的关注和广泛的应用^[4]。传统的电流滞环瞬时值控制技术大多以电感电流作为反馈变量, 这种控制方式有较强的抗负载短路的能力, 带线性负载时输出电压波形质量较高, 但是整流性负载特性较差。随着计算机等整流性用电设备的日益增多, 对逆变电源带整流性负载的能力要求越来越严格。于是提出了以电容电流作为反馈变量的电流滞环瞬时值控制技术^[5], 这种逆变电源具有较强的带整流性负载的能力, 各种负载下的输出电压波形质量较高, 外特性较硬。

本文研究了以电容电流为反馈量的逆变器电流滞环控制方法, 提出了实现电路, 并从理论、仿真和实验方面与电感电流反馈进行比较研究。

2 电感电流反馈方式

传统的电流滞环控制逆变器多采用滤波电感电流作为反馈量, 其系统框图如图1所示。图中, 逆变器主电路为全桥结构, 电流内环采用三态滞环电

流跟踪控制技术, S/H为时钟信号采用, 电压外环为PI调节器, 输出滤波器为LC二阶低通滤波器。

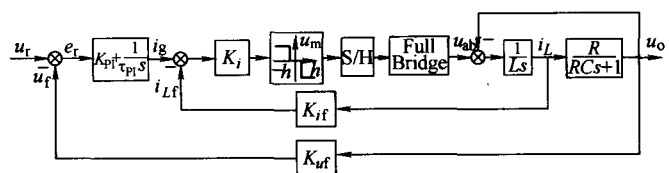


图1 电感电流作为反馈量的电流滞环瞬时值控制

由于滤波电感电流事实上就是逆变桥输出电压经过电感积分的结果, 所以在瞬时值电流滞环控制中, 将滤波电感中的电流直接作为反馈信号, 电感电流就可以作为斜坡函数, 使系统产生自持振荡。然后利用迟滞比较器形成一个以基准电流为中心的滞环, 将反馈电流的变化控制在这个滞环内。电流内环具有自然限流功能, 可以使逆变器在输出短路时限制最大输出电流, 这也使得逆变器外特性较软。一般情况下为了保证输出电压波形, 滤波电感都选择较大, 这就导致了系统的动态响应性能变差。而且当逆变器带整流性负载时, 当输出电压大于整流性负载上直流电容电压时, 逆变器要提供很大电流, 由于电流环的内在限流作用, 电感不能瞬时提供大电流, 只能从滤波电容上抽取电流来补偿, 这导致输出电压波形削顶, 波形畸变。

3 电容电流反馈控制方式

采用电容电流反馈方式的电流滞环控制逆变器可以很好地改善逆变器输出外特性, 提高系统带整流性负载的能力和动态响应速度。

3.1 电路结构

电容电流反馈方式的电流滞环瞬时值控制技术

电路结构如图2所示。控制电路采用瞬时电压电流反馈双闭环调节方式。外环为电压环，内环为电流环。输出电压瞬时值反馈信号 u_f 与基准电压信号 u_r 进行比较，其误差信号经过电压调节器，调节器的输出作为电流内环的给定信号 i_g ，电流内环为三态电流滞环跟踪控制，由两个比较器（CMP1和CMP2）形成电流迟滞比较器， h 的大小决定迟滞比较器的环宽，电流瞬时值反馈信号 i_f 在环宽为 $2h$ 的滞环内跟踪电流基准 i_g 的变化，其输出的电流信号经过时钟信号采样后，通过隔离驱动电路控制功率开关器件，输出离散的脉冲调制波，经过 LC 低通滤波器后得到光滑的正弦波。

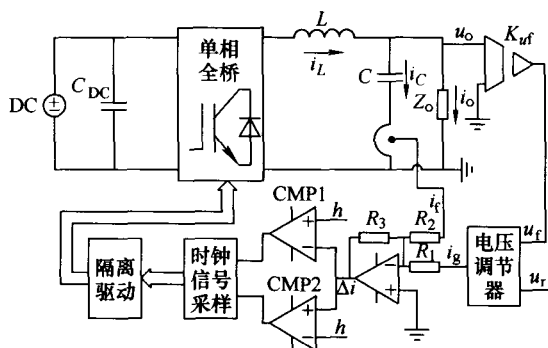


图2 电路结构

3.2 控制特性及分析

电容电流反馈方式的逆变器系统框图如图3所示。由于电流内环包括一个迟滞比较器，是一个非线性系统，通过分析可知，当调制频率足够高时（远高于输出滤波器频带宽度），电流内环可以等效为一个电流跟随器，即比例环节^[2]。

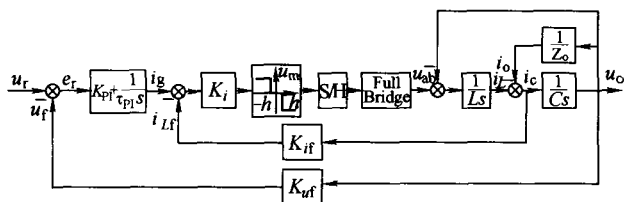


图3 电容电流反馈方式的电流滞环瞬时值控制

由以上分析可得到的系统等效的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{U_o(s)}{U_r(s)} = \frac{K(K_{PI}\tau_{PI}s + 1)}{\tau_{PI}Cs^2 + K_{uf}KK_{PI}\tau_{PI}s + KK_{uf}}$$

式中， K 为电流内环等效的比例环节增益； K_{PI} 为电压调节器比例系数； τ_{PI} 为电压调节器积分时间常数。

可见，电容电流反馈的滞环控制逆变电源本质上是一个二阶控制系统，其闭环传递函数分母各系数均为正，根据劳斯判据可知，这是一个稳定的系统。

由图3及系统等效传递函数分析可知，电容电流反馈方式将负载扰动包含在反馈环路的前向通道内，能够及时对扰动产生抑制。而且滤波电容电流相当于输出电压的微分，反映输出电压的变化，并代表输出电压的变化趋势，可以提前对输出电压进行校正控制，所以采用电容电流反馈的系统具有更好的负载适应能力，尤其是很强的带整流性负载能力。负载发生扰动时，由于电感电流不能突变，只能影响电容电流。因此，电容电流反馈可以直接反映出负载电流的瞬时变化。

由上面分析可知，对滤波电容电流进行采样反馈，系统具有良好的静态和动态性能。

4 仿真分析

应用 PSIM 仿真软件分别构建电感电流反馈和电容电流反馈滞环控制逆变器的仿真模型，两个仿真模型中，除了电流瞬时值反馈方式不同之外，其他控制参数完全相同。仿真条件为：全桥电路，输入直流电压 $u_i = 200V$ ，输出交流电压 $u_o = 115V$ ，频率 $f_o = 400Hz$ ，时钟信号采样频率 $f_s = 100kHz$ ，输出滤波器 $L = 0.2mH$ ， $C = 30\mu F$ 。

4.1 系统外特性比较

图4所示为两种电流瞬时值反馈方式下的外特性仿真结果。负载为阻性，仿真时保证两个系统的输出功率相同。仿真结果表明，采用电感电流反馈时，输出电压随着负载的增加减小较多，外特性较软；而采用电容电流反馈时，输出电压随负载的增加减小较少。可见，采用电容电流反馈的逆变器外特性较电感电流反馈方式更硬。

4.2 整流性负载下输出电压谐波分析

两种逆变系统均带整流性负载（波峰系数为3，视在功率为1kVA）时，仿真结果分别如图5、图6所示。采用电感电流反馈时，逆变器输出电压的仿真波形如图5所示。分析表明，此时输出电压总谐波含量为8.90%。

采用电容电流反馈时，逆变器输出电压的仿真波形如图6所示。分析表明，此时输出电压总谐波含量为3.57%。

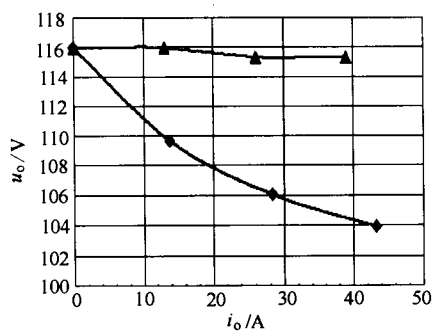


图4 外特性比较

◆电感电流反馈方式 ▲电容电流反馈方式

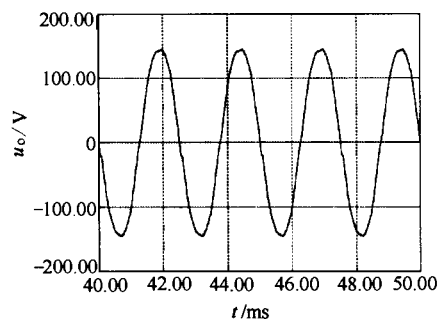


图5 电感电流反馈方式输出电压仿真波形

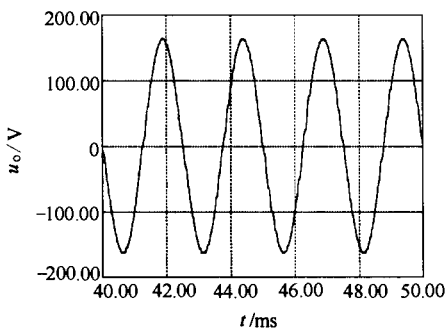


图6 电容电流反馈方式输出电压仿真波形

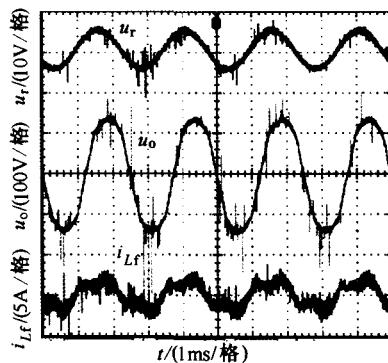
可见,在逆变器仿真系统各参数相同的情况下,带整流性负载时,电感电流反馈方式的逆变器输出电压波形削顶,产生畸变,导致谐波含量增大。而采用电容电流反馈时,输出电压的总谐波含量比采用电感电流反馈时小得多,表明采用电容电流反馈的逆变器具有很强的带整流性负载的能力,与理论分析一致。

5 实验结果及分析

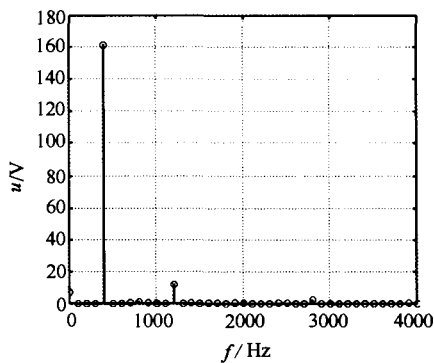
为了验证上述分析的正确性,研制了一台电流

滞环控制逆变电源样机,分别采用电感电流反馈和电容电流反馈控制方式。样机控制参数与PSIM仿真模型中的参数相同。

逆变器负载均为整流性负载(波峰系数为3,视在功率为1kVA),比较两种电流反馈方式下输出电压的质量。图7a、b分别为电感电流反馈方式的输出波形及输出电压的频谱分布,图中, u_r 为基准正弦电压, u_o 为逆变输出电压, i_{Lf} 为电感电流采样波形。对输出电压进行频谱分析,可得输出电压总谐波含量为7.93%。



(a) 实测波形



(b) 输出电压频谱分布

图7 电感电流反馈方式

电容电流反馈方式的输出波形及输出电压的频谱分布分别如图8a、b所示,图中, i_{Cf} 为电容电流采样波形。对输出电压进行频谱分析,可得此时输出电压总谐波含量为2.04%。

对比图7和图8的实验结果可知:图7中输出电压波形出现了削顶,畸变严重,频谱分析显示,三次谐波较大,其总谐波含量远大于图8a中的输出电压。实验结果表明,采用电容电流采样的逆变器带整流性负载的能力显著优于电感电流采样的逆变器,与理论分析及仿真波形一致。

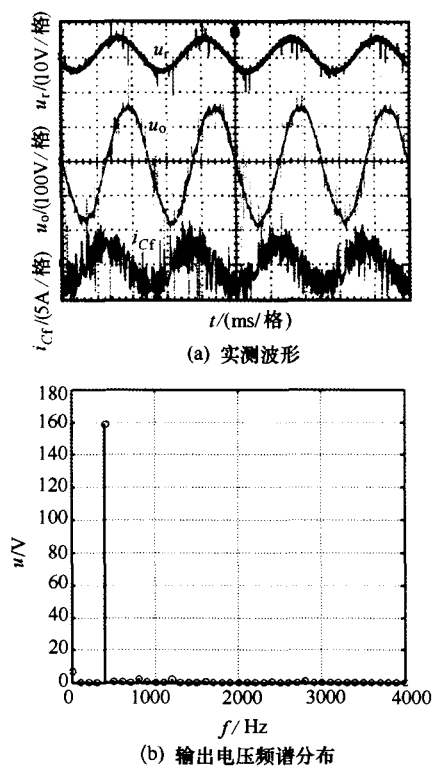


图8 电容电流反馈方式

6 结束语

本文对滞环逆变器电流内环采用电感电流和电容电流反馈两种不同方式从理论、仿真和实验三个方面进行了研究。通过研究分析表明,与电感电流相比,采用电容电流反馈方式的电流滞环控制逆变器虽然不具有内在的限流能力,但其显著优势在于:

- (1) 外特性较硬。
- (2) 具有较强的整流性负载适应能力。
- (3) 动态响应性能好。

(上接第62页)

Tang Yang

(Zhejiang University)

Abstract The idea of a new interior-type position sensor in hybrid stepping motor position servo system is given. The theory of this new sensor is analyzed using the method of specific permanence of air gap. On this base, the achievement of con-

参考文献

- [1] Vanja Ambrožič, Rastko Fišer, et al. Direct current control – a new current regulation principle [J]. IEEE Trans on PE, 2003, 18 (1).
- [2] 陈东华, 谢少军, 周波. 瞬时值电流控制逆变技术比较 [J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36 (3), 343 – 347.
- [3] Wu Hongying, Lin Dong, Zhang Dehua, et al. A current-mode control technique with instantaneous inductor-current feedback for UPS inverters [C]. IEEE APEC'99 Conf Rec 1999: 951 – 957.
- [4] 孟宪会. 400Hz 模块化逆变器研制 [M]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [5] Ryan M J, Lorenz R D. A high performance sine wave inverter controller with capacitor current feedback and "Back-EMF" Decoupling [C]. IEEE PESC'95 Conf Rec 1995: 507 – 513.

Comparative Research on Sine Wave Inverters with Inductor Current and Capacitor Current Regulation

Ye Nan

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics)

Abstract The output filter capacitor current is implemented in the inner current control loop. Theoretic analysis, simulation and experiments are carried out between capacitor current feedback and inductor current feedback control methods for the inverter prototype. The conclusion is that both output voltage waveform at rectifier load and system output characteristic may be improved apparently with capacitor current feedback regulation.

Keywords inverter control current feedback

收稿日期: 2005-11-25

tinuous rotor position detection by the variation of the reluctance of stepping motor is proposed. This position sensor of built-in technology makes the foundation of self-synchronous closed-loop control of stepping motor.

Keywords interior-type position sensor hybrid motor

收稿日期: 2006-05-30