

# 逆变器电感非理想特性影响及补偿控制研究

袁义生

(华东交通大学, 电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**针对逆变器滤波电感的非理想特性及其对系统的影响,提出了一种补偿电感非理想特性的控制方法。介绍了逆变器典型双环控制的原理,详细分析了数字化电流控制环的传递函数及参数影响,在此基础上分析了电感工作过程中的非理想特性对电流环的影响,进而提出了在控制环节中对该非理想现象进行补偿校正的方法,并对其改善效果进行了分析。通过仿真比较了补偿前后两种控制方案的系统特性,并在一台实验室样机上进行了验证。

**关键词:**逆变器; 双环控制; 电感特性; 补偿控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2010)11-0072-03

## The Non-idealized Character Effect of Inductor and Compensation Control in Inverters

YUAN Yi-sheng

(East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Based on the effect of the non-idealized character of the inductor on system, a compensation control approach is presented. The theory of double-loops controller is introduced, the transfer function of the digitalized current loop is derived and the parameter design of the current loop is explained. After analyzing the effect of the nonlinear character on current loop's stability, a compensation control method is proposed and analyzed in detail. Two control methods before and after compensation are compared by simulation, and the laboratory prototype is also produced and tested. Both simulation and experiment prove the proposed compensation controller is available.

**Keywords:** inverter; double-loop control; inductor character; compensation control

**Foundation Project:** Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51067004)

## 1 引言

正弦波逆变器广泛应用在风力发电、光伏发电、不间断电源等系统中。近年来各种逆变器数字控制技术,如无差拍控制、PID控制、重复控制、预测控制和复合控制,得到了深入研究及应用。其中无差拍控制<sup>[1-2]</sup>完全是基于电路模型的控制方法,其动态响应快,但鲁棒性不好,因为其控制参数中直接含有滤波电感电容和负载参数,这些参数的准确性对控制特性影响很大。PID控制<sup>[3-4]</sup>是基于电路模型进行补偿的控制方法,其控制精度高,但由于模型不能非常精确,参数不易整定,且在非线性负载下输出电压失真度偏高。重复控制和预测控制则无需以电路精确模型为基础,两者分别是

对历史和未来的误差量进行计算并校正控制方法,其中以重复控制研究为多,因为它能改善非线性负载下的周期性输出电压畸变,但单独的重复控制动态特性较差。复合控制<sup>[5-6]</sup>目前研究较多的是PID控制结合重复控制或者预测控制的方案,使系统获得好的动态响应及非线性负载下输出电压失真度的降低。

这些控制方法的数学模型需要滤波电感、滤波电容,以及负载的模型。但实际器件是非理想的,逆变器中电感器的电感值即为一个与工作条件相关的变量。若在逆变器数学模型中将电感量当作固定值进行理论分析是不够准确的,严重时甚至影响系统稳定性分析。

以常用数字PID双环控制方案为基础,分析其电流环的设计,研究电感值变化对电流环稳定性和动态响应的影响,进而分析电感非理想特性在系统运行过程中的影响,提出一种对电感非理想特性进行补偿的控制方法。最后通过仿真和实验方法验证了理论分析的正确性。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51067004)

定稿日期: 2010-06-07

作者简介: 袁义生(1974-),男,江西上高人,博士,副教授,研究方向为电力电子系统及控制。

## 2 逆变器双环控制

图 1 示出全桥逆变电路,  $L$  和  $C$  分别为输出滤波电感和滤波电容。

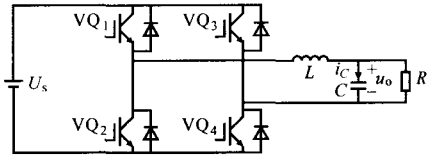


图 1 全桥 PWM 逆变器

### 2.1 双环控制原理

相应的双环控制方案如图 2 所示。虚框内为逆变器主电路模型。控制系统的最外环采用输出电压  $u_o$  实时反馈控制, 控制通道上采用一个简单的放大增益  $K_{pi}$ 。

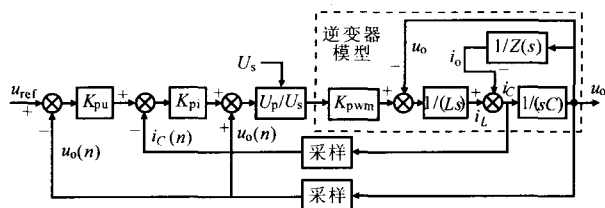


图 2 逆变器双环控制框图

因为电容电流  $i_c$  值的变化, 即电荷量的变化最直接反映了  $u_o$  的变化, 所以中间的电流环采用了反馈输出滤波  $i_c$  的方案, 其放大增益  $K_{pi}$  则远大于  $K_{pi}$ , 以使电流环有足够的带宽能迅速跟踪电压环的输出。

控制环最内部是一个干扰前馈抑制环。从逆变电路的内部模型可见,  $u_o$  作为一个干扰量, 在内部反馈作用于滤波电感  $L$  上; 而输入电压  $U_s$  作为一个干扰量, 影响了 PWM 调制系数  $K_{pwm}$  ( $K_{pwm} = U_p / U_p$ ,  $U_p$  为三角波载波的峰值)。因此, 最内环一方面将  $u_o$  正馈引入控制系统, 另一方面将  $U_s$  引入一个除法器  $U_p / U_s$ , 得到了  $K_{pwm}$  的倒数, 最终在系统前向通道上抵消了  $u_o$  和  $U_s$ 。推导得到系统  $s$  域的闭环传递函数如下:

$$G_c(s) = \frac{K_{pi} K_{pi}}{LCs^2 + [L/Z(s) + K_{pi} C]s + K_{pi} K_{pi}} \quad (1)$$

### 2.2 电流环传递函数

由于  $U_s$  和  $u_o$  的干扰在电流环中已经被抵消, 故电流环的模型可以简化为图 3。

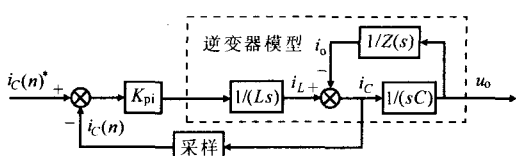


图 3 简化的电流环模型

不考虑负载输出电流  $i_o$  的扰动, 对数字采样周期为  $T$  和含零阶保持器的电流环推导得到其  $z$  域开环传递函数为:  $G_o(z) = TK_{pi} / [L(z-1)]$ 。

对其特征方程  $1 + G_o(z) = 0$  求解得到:

$$z = 1 - TK_{pi} / L \quad (2)$$

电流环稳定条件是  $|z| < 1$ , 则  $K_{pi}$  应符合:

$$0 < K_{pi} < 2L / T \quad (3)$$

由上式可见,  $K_{pi}$  的选择与  $L$  值相关。  $L$  值越大, 满足稳定性的  $K_{pi}$  也应越大, 从而有更好的动态特性; 而  $L$  值越小,  $K_{pi}$  也应该减小以维持控制环的稳定性, 从而降低了电流环的动态特性。

### 2.3 电感的非理想特性

实际各种导磁材料, 如铁氧体、铁粉心、Kool-Mu 的磁导率都不是固定不变的, 而是一个随磁场强度  $H$  改变的量。图 4 为几种 Kool-Mu 材料磁芯的磁导率相对磁场强度的变化曲线。

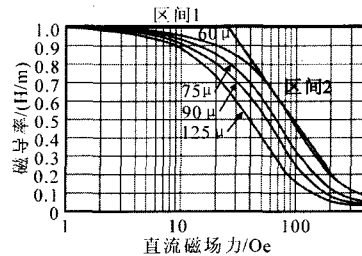


图 4 磁导率-直流磁场力的变化曲线

在工作过程中, 流过  $L$  的电流  $i_L$  随负载正弦波电流而改变, 导致其磁场强度变化。根据图 4 所示, 其磁导率也随之改变, 最终使得电感器的电感量在一个正弦周期内有规律的波动。这表现为在  $1/4$  正弦周期内, 随着  $i_L$  呈正弦规律上升,  $L$  值则随之下降。

而由式(2)可知,  $L$  值减小, 电流环极点逐渐往零方向移动, 这可使电流环的动态响应速度变快。但由式(3)可知,  $L$  值的减小, 将使维持电流环稳定的  $K_{pi}$  的选择范围减小。

故  $L$  的这种非理想特性对系统的影响是: 若控制参数  $K_{pi}$  选择不合理, 将出现电流环在小电流下稳定, 而在大电流峰值处不稳定的现象。或者,  $K_{pi}$  为了满足大电流下的稳定性, 却牺牲了小电流下的动态特性。

### 2.4 插入补偿环节的电流环控制方案

在设计  $L$  时, 为减小体积, 往往允许电感值在满载峰值电流下减额为初始值的 50% 左右。为了维持控制环的稳定性,  $K_{pi}$  需要减小设计。但若再考虑系统过载状态,  $K_{pi}$  将设计得很小, 这又降低了系统的动态响应能力, 尤其是损害了小电流下

的动态响应能力。

为此,提出了一种对电感非理想特性进行补偿控制的方案。如图5所示,将逆变器模型中的电感环节表示为电流的函数 $1/[sL(i)]$ ,而在电流环的前向通道上增加一个非线性增益环节 $L(i)$ ,这样整个控制环中的 $L$ 就被抵消了。电流环开环传递函数表示为: $G_o(z)=TK_{pi}/(z-1)$ 。相应的闭环极点和稳定条件表示为: $z=1-TK_{pi}, 0<K_{pi}<2/T$ 。

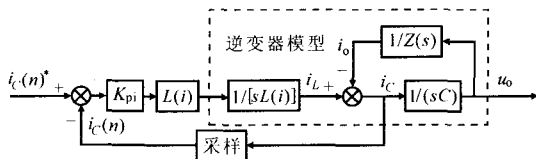


图5 电感非理想特性补偿的电流环控制框图

由上式可见,电流环动态特性变成一个仅与 $T$ 和 $K_{pi}$ 相关的量,保持系统稳定的 $K_{pi}$ 条件仅与 $T$ 有关,大大简化了系统的设计和分析。

$L(i)$ 的表达式是一个复杂方程,可由厂家提供的 $L(H)$ 曲线根据公式 $NI=HL_m$ 推导得到。但这样的方程计算量大,不利于实际的实时控制。所以,实用的方法还是根据磁导率随磁场强度变化曲线进行多折线拟合处理。如图4所示,将常用的 $-60\mu$ 磁性材料的特性曲线用区间1和区间2两条折线拟和代替。这在实际上是可行的,因为PID控制对小信号参数变化不敏感。

这样,为补偿电感非理想特性,还需要对 $i_L$ 采样。但由于在实际逆变器设计时,会对 $i_L$ 和 $i_o$ 两者同时采样相减得到 $i_c$ ,故并不增加电路成本。

### 3 系统仿真

对一个360V直流输入,220V交流输出,开关频率20kHz,额定负载为1kW的系统进行仿真比较分析。参数如下:当 $i_L < 2$ A时, $L_r=2.5$ mH;当 $i_L \geq 2$ A时, $L_r=3.02-0.26i_L$ ;  $C_r=4.7$ μF;  $K_{pi}=0.1$ ;  $K_{pi}=60$ 。随 $i_L$ 的变化,设计 $L$ 在额定电阻负载峰值电流处下降到初始值2.5mH一半,即1.25mH。根据式(3),在峰值电流处 $K_{pi}$ 应该小于50才稳定,上述参数中 $K_{pi}=60$ ,这将使系统出现不稳定。图6示出仿真结果。

由图6a可见在 $u_o$ 峰值附近,即 $i_L$ 峰值附近, $u_o$ 和 $i_L$ 都出现了振荡现象,两者皆不稳定,增加了 $u_o$ 的THD。按照图5的补偿方法插入了补偿环节 $L(i)$ ,并修改 $K_{pi}=28000$ ,其余参数不变,仿真波形如图6b可见,系统 $u_o$ 和 $i_L$ 获得了稳定控制,降低了 $u_o$ 的THD。

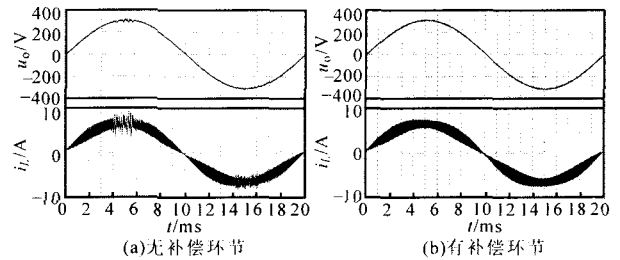


图6 输出电压 $u_o$ 和电感电流 $i_L$ 仿真

### 4 实验结果

对一台设计参数同仿真参数一样的逆变器原理样机进行了测试。样机的逆变电感采用两颗MS-200060-2叠加绕制。图7a为无电感非理想特性补偿控制下的 $u_o, i_o$ 波形。可见在 $i_o$ 峰值附近, $i_o$ 和 $u_o$ 都出现振荡,这是由于 $i_o$ 增加后电流环不稳定造成的。图7b为采用电感非理想特性补偿控制后的 $u_o, i_o$ 波形,由图可见消除了峰值电流附近的振荡现象。实验证明了上文分析和所提出的控制方案是正确的。

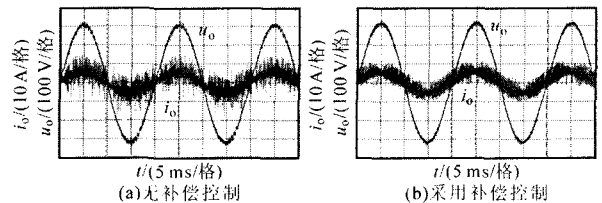


图7 实验波形

### 5 结论

分析了一种双环控制的逆变器结构中滤波电感的非理想因素对电流环的动态特性和稳定性的影响,提出一种补偿控制方案以抵消电感值变化对系统控制环的影响。采用仿真和实验证明了分析的正确性和所提控制方案的有效性。

### 参考文献

- [1] 汪孟,刘亚东,李方正,等. UPS逆变器的渐进收敛无差拍控制[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(1): 47-50.
- [2] 张超,王章权,蒋燕君,等. 无差拍控制在光伏并网发电系统中的应用[J]. 电力电子技术, 2007, 41(7): 3-5.
- [3] 蔡昆,李耀华,胜晓松,等. 高性能单相电压源逆变器的输出控制[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 104-107.
- [4] 袁义生,宋平岗,张榴晨. 独立逆变器的无电流互感器控制研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(10): 71-73.
- [5] 熊健,周亮,张凯,等. 一种高性能的单相逆变器多环控制方案[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 79-83.
- [6] 李德华,余鑫,张志远,等. 一种新型控制策略在单相逆变器中的应用[J]. 电力电子技术, 2007, 41(8): 75-76.