

基于复合控制的中频逆变电源研究

刁元均, 邹 滨

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对中频逆变电源的特殊应用领域和对其较高的性能要求, 提出了一种基于重复控制和 PI 控制的复合控制策略, 并建立了中频逆变电源的数学模型, 详细分析了重复控制系统的原理和结构, 重点阐述了重复控制系统中的重复控制发生器和补偿器的设计方法, 最后建立了该复合控制的系统框图。该方案利用重复控制来提高系统的稳态性能和谐波抑制能力, 而 PI 控制则用于改善系统的动态特性。基于该复合控制策略, 采用仿真软件 Matlab 7.0 建立了中频逆变电源的仿真模型, 仿真实验结果表明, 该方案能够使中频逆变电源在额定阻性负载、突加和突减阻性负载时均能获得良好的稳态和动态性能, 即使在带非线性负载时也能获得比较理想的输出波形。

关键词: 逆变电源; 重复控制; PI 控制; 复合控制

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0066-03

400 Hz 中频电源属于特种电源范畴, 一般为重要的电子设备提供工作电源, 往往要求具有高度的可靠性和优良的静、动态性能。现采用基于重复控制和 PI 控制的逆变电源复合控制策略, 重复控制用于保证稳态波形质量, PI 控制则用于加快系统的动态响应过程^[1-3]。

1 逆变器的数学模型

图 1 所示为单相全桥逆变器的主电路, 其中, U 为直流母线电压, U_i 为滤波电路输入电压, U_o 为滤波电路输出电压, L 为滤波电感, C 为滤波电容, R_L 和 R_C 分别为滤波电感、电容的等效串联电阻。因为带 LC 滤波器的逆变器在空载时有最强的振荡倾向, 故系统的设计以空载状态下谐振频率点处的稳定性作为设计指标。求得逆变器空载时的传递函数为

$$P(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{R_C C s + 1}{LC s^2 + (R_L + R_C) C s + 1} \quad (1)$$

这里取 $L = 1.3 \text{ mH}$, $C = 7.6 \text{ } \mu\text{F}$, $R_L = 0.1 \text{ } \Omega$, $R_C = 0.002 \text{ } \Omega$, 代入式(1)并离散化得:

$$P(z) = \frac{0.0594 + 0.1188z^{-1} + 0.0593z^{-2}}{1 - 1.7588z^{-1} + 0.9963z^{-2}} \quad (2)$$

式中 s, z 均为算子。

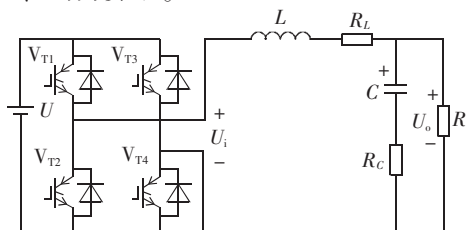


图 1 单相全桥逆变器的主电路

Fig.1 Main circuit of single phase full bridge inverter

2 重复控制

2.1 基本原理

重复控制^[4-7]是能消除所有包含在稳定闭环内的周期性误差的一种控制方案。其基本思想源于控制理论中的内模原理。内模原理是把作用于系统外部信号的动力学数学模型植入控制器以构成高精度反馈控制, 那么该系统输出就能够无静差地跟踪参考输入信号。

常用的重复控制系统见图 2。其中, r 为给定的参考正弦信号, e 为误差信号, d 为扰动信号, y 为逆变器输出电压, z^{-N} 为周期延迟环节, N 为在一个基波周期内的采样次数, $Q(z)$ 为带限滤波器, $C(z)$ 为重复控制环路的补偿器, $P(z)$ 为控制对象。

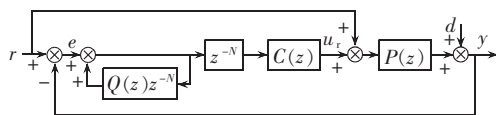


图 2 重复控制系统框图

Fig.2 Repetitive control system

重复控制假定前一周期出现的基波波形畸变将在下一基波周期的同一时间重复出现, 控制器根据给定信号和反馈信号的误差确定所需校正信号, 在下一基波周期的同一时间将此信号叠加到原控制信号上, 以消除后面各周期中将出现的重复性畸变。

2.2 重复控制系统参数设计

2.2.1 重复控制发生器设计

系统参考正弦频率为 400 Hz, 采样周期为 50 μs , 则可求得在一个基波周期内采样次数 $N = 50$; $Q(z)$ 可为略小于 1 的常数或低通滤波器函数, 取低通滤波器函数要比取常数好, 但实现起来较复杂, 这里取经验常数 0.95。

2.2.2 补偿器 $C(z)$ 设计

重复控制器的补偿器^[8-10] $C(z)$ 是针对控制对象 $P(z)$ 的特性提供相位、幅值补偿,使系统在中、低频段成为单位增益,没有相位滞后环,它直接影响重复控制系统性能的好坏。

$C(z) = K_r z^k S(z)$, 其中, K_r 为重复控制增益且 $K_r \in (0, 1)$, 用来调节重复控制器输出幅值, 这里取 $K_r = 0.7$; z^k 为超前环节, 用来补偿控制对象本身的相位滞后, 这里取 $k = 6$; $S(z)$ 为二阶滤波器, 其 S 域的传递函数表示形式为

$$S(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2}$$

式中 ξ 是阻尼比, 为防止系统振荡, 一般取 $\xi > 1$, 这里取 $\xi = 1.5$; ω_c 是补偿器截止角速度, $\omega_c = 2\pi f_c = 1/\sqrt{LC}$ 。

根据系统输出滤波器参数 $L = 1.3 \text{ mH}$, $C = 7.6 \text{ }\mu\text{F}$, 可求得 $f_c = 1600 \text{ Hz}$, $\omega_c = 10060 \text{ rad/s}$, 因此可得:

$$S(s) = \frac{10060^2}{s^2 + 2 \times 1.5 \times 10060 s + 10060^2} \quad (3)$$

式(3)离散化后可得:

$$S(z) = \frac{0.0348 + 0.0696z^{-1} + 0.0348z^{-2}}{1 - 1.0307z^{-1} + 0.1699z^{-2}} \quad (4)$$

3 复合控制^[11-15]

重复控制是一种有效改善逆变电源稳态性能的方法, 但由于重复控制存在着周期延迟环节 z^{-N} , 控制指令是滞后一个基波周期输出的, 这样, 当系统受到外界扰动时, 消除扰动对系统的影响至少需要一个基波周期, 而且重复控制对误差的积分是逐周期进行的。因此, 重复控制的动态响应特性较差。而数字 PI 控制有算法简单、动态响应速度快、鲁棒性强的优点, 但若直接应用到逆变器的控制中易造成跟踪效果差、稳态精度低。所以, 若将这 2 种控制方法结合起来(如图 3 所示), 可使系统具有较好的动态和静态性能。

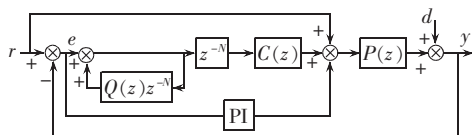


图 3 复合控制系统框图

Fig.3 Hybrid control system

4 系统仿真建模及结果分析

根据上述控制策略, 采用仿真软件 Matlab 7.0 建立了基于重复控制和 PI 控制的中频逆变电源仿真模型, 见图 4。仿真参数中: 直流母线电压 $U = 310 \text{ V}$; 输出滤波器 $L = 1.3 \text{ mH}$, $C = 7.6 \text{ }\mu\text{F}$; 输出电压有效值为 115 V , 频率 400 Hz ; 额定负载 $26.45 \text{ }\Omega$; 开关频率以及采样频率均为 20 kHz ; 其中, 重复控制器采用 S-function 函数实现。

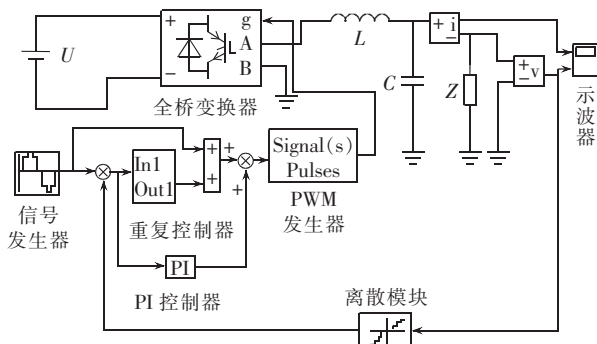


图 4 基于重复控制和 PI 控制的中频逆变电源仿真模型

Fig.4 Simulation model of medium frequency inverter based on repetitive control and PI control

仿真结果如图 5~9 所示。由仿真结果可见: 只有重复控制时, 在额定负载下, 电压和电流波形在第 1 个采样周期均有一个尖峰脉冲(见图 5), 当在 $t = 0.005 \text{ s}$ 突加 $5 \text{ }\Omega$ 阻性负载时, 电压波形有明显的下降(见图 7, 图中 $t = 0.0075 \text{ s}$ 时突卸负载; 图 8 同)。这是因为重复控制含延迟环节, 其控制指令并不是立即输出, 而是滞后一个参考周期才输出, 这样如果系统内部出现干扰, 消除干扰对输出的影响至少需要一个参考周期。在干扰出现的一个周期内系统对于干扰并不产生任何调节作用, 几乎处于开环控制状态。

当采用复合控制时, 在额定负载及突加和突卸 $5 \text{ }\Omega$ 阻性负载时(见图 6、8), 输出电压和电流波形均很平滑, 稳态误差及 THD 值均较小。即使在带整流桥负载时(见图 9), 输出电压波形的波动也较小, 总的谐波畸变率低。

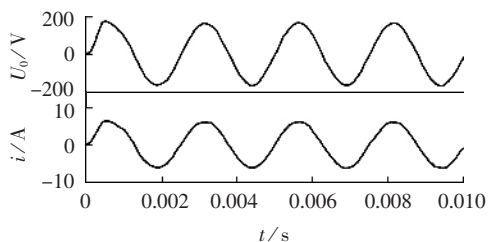


图 5 重复控制的额定负载下的电压和电流波形 (电压波形的 THD 为 0.75 %)

Fig.5 Waveforms of output voltage and current under repetitive control for rated load (THD of output voltage is 0.75 %)

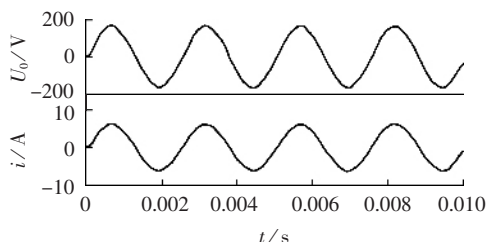


图 6 复合控制的额定负载下的电压和电流波形 (电压波形的 THD 为 0.49 %)

Fig.6 Waveforms of output voltage and current under hybrid control for rated load (THD of output voltage is 0.49 %)

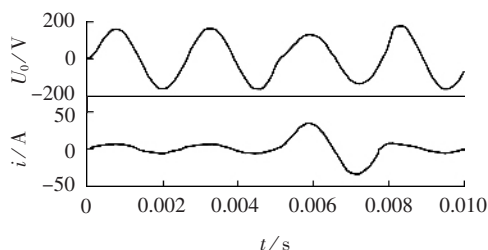


图 7 突加和突卸 5 Ω 阻性负载时重复控制的电压和电流波形(电压波形的 THD 为 0.82 %)

Fig.7 Waveforms of output voltage and current under repetitive control for sudden load change of 5 Ω (THD of output voltage is 0.82 %)

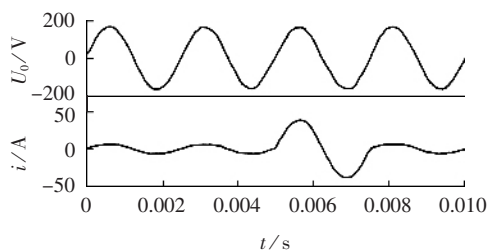


图 8 突加和突卸 5 Ω 阻性负载时复合控制的电压和电流波形(电压波形的 THD 为 0.56 %)

Fig.8 Waveforms of output voltage and current under hybrid control for sudden load change of 5 Ω (THD of output voltage is 0.56 %)

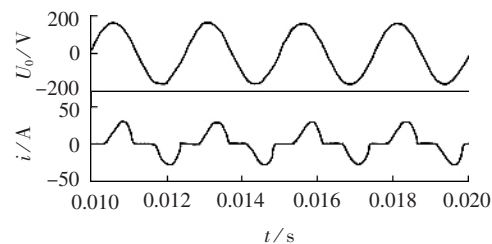


图 9 带整流桥负载时复合控制的电压和电流波形(电压波形的 THD 为 2.97 %)

Fig.9 Waveforms of output voltage and current under hybrid control for rectifier bridge (THD of output voltage is 2.97 %)

5 结语

基于重复控制和 PI 控制的复合控制策略克服了这 2 种控制方法的缺点,吸取了各自的长处,仿真实验结果表明,将其运用于中频逆变电源的控制中,能够取得理想的动态和稳态性能。

参考文献:

- [1] TSAI Mi-ching, YAO Wu-sung. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs [J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2002, 10(4): 547-555.
- [2] ZHANG Kai, CHEN Jian. Study on an inverter with assignment and repetitive control for UPS applications[C]//IPEMC'2000. Beijing, China: [s.n.], 2000: 650-653.
- [3] TZOU Ying-yu, JUNG Shih-liang, YEH Hsin-chung. Adaptive repetitive control of PWM inverters for very low THD AC-voltage regulation with unknown loads[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1999, 14(5): 973-981.

- [4] ABDEL-RAHIM N M, QUAICOE J E. Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(4): 532-541.
- [5] TZOU Ying-yu, OU Rong-shyang, JUNG Shih-liang, et al. High-performance programmable AC power source with low harmonic distortion using DSP-based repetitive control technique [J]. IEEE Trans Power Electron, 1997, 12(4): 715-725.
- [6] HANEYOSHI T, KAWAMURA A, HOFT R G. Waveform compensation of PWM inverter with cyclic fluctuating loads [J]. IEEE Trans Power Electron, 1998, 24(4): 582-589.
- [7] 郭卫农, 陈坚. 基于状态观测器的逆变器数字双环控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 64-68.
GUO Wei-nong, CHEN Jian. Study on digital dual-loop control for inverters based on state-observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 64-68.
- [8] 陈宏, 胡育文. 针对逆变电源的重复控制器设计[J]. 电力电子技术, 2002, 36(5): 68-71.
CHEN Hong, HU Yu-wen. Design of repetitive controller for inverter[J]. Power Electronics, 2002, 36(5): 68-71.
- [9] ABDEL-RAHIM N M, QUAICOE J E. Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(4): 532-541.
- [10] BUSO S, FASOLO S, MATTAVELLI P. Uninterruptible power supply multiloop control employing digital predictive voltage and current regulator[J]. IEEE Trans on Ind Application, 2001, 11(4): 1846-1853.
- [11] ZHANG Kai, KANG Yong, XIONG Jian, et al. Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 784-792.
- [12] VENKATARAMANAN G, DIVAN D M, JHANS T M. Discrete pulse modulation strategies for high-frequency inverter systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(3): 279-287.
- [13] ESPELABE P M, BOSE B K. High-frequency link power conversion[J]. IEEE Trans on IA, 1977, 13(5): 387-394.
- [14] TAI Tsang-li, CHEN Jian-shiang. UPS inverter design using discrete time sliding mode control scheme[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 67-75.
- [15] PAN Zhi-yang, LUO Fang-lin. Novel soft-switching inverter for brushless DC motor variable speed drive system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(2): 280-288.
- [16] ROH C L, CHUTNG M J. Design of repetitive control system for an uncertain plant[J]. Electronics Letters, 1995, 31(22): 1959-1960.
- [17] STEINBUCH M. Repetitive control for systems with uncertain period-time[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2103-2109.

(责任编辑: 康鲁豫)

作者简介:

刁元均(1980-), 男, 四川泸州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子技术及其应用(E-mail: dyj248@163.com);

邹滨(1963-), 男, 甘肃兰州人, 副教授, 主要研究方向为电力电子技术及电力传动控制。

Hybrid control of medium frequency inverter

DIAO Yuan-jun,ZOU Bin

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To meet the requirements for high performance of medium frequency inverter in special applications, a hybrid control scheme based on repetitive control and PI control is proposed. The mathematical model of the medium frequency inverter is founded and the control theory and structure of the repetitive control system are described. The block diagram of the hybrid control system is given and the design of the generator and compensator in repetitive control system is expatiated. The repetitive control is used to improve the static performance and harmonic suppression capability of system, and the PI control is used to enhance the dynamic performance of system. The simulation model of medium frequency inverter based on the hybrid control is founded using simulation software Matlab7.0. Simulation results show that, the proposed control scheme can endow the medium frequency inverter with better static and dynamic performance for rated resistance load and sudden resistance load change. The system can obtain better output waveforms even for nonlinear load.

Key words: inverter; repetitive control; PI control; hybrid control