

文章编号:1000-582X(2008)07-0766-04

非接触电能传输系统恒流控制策略

孙 跃,陈国东,戴 欣,苏玉刚,唐春森,王智慧

(重庆大学 自动化学院,重庆 400030)

摘 要:针对负载切换时造成初级回路的导轨电流变化问题,提出了利用智能分段控制算法来调节控制脉冲中的移相角,分析了非接触电能传输系统主电路的电流恒定性问题,最终保证原边导轨电流的恒定,使得系统能在额定条件下正常工作,并对运用分段控制算法的主电路采用了 MATLAB 的 Simulink 进行了仿真,通过仿真图可得在负载切换前后电流的恒定时间仅在 2 ms 之内,结果表明采用分段控制算法的仿真结果与理论分析相符合。

关键词:非接触电能传输;恒流控制;分段控制;移相角

中图分类号:TM131

文献标志码:A

A constant current control method for contactless power transmission systems

SUN Yue, CHEN Guo-dong, DAI Xin, SU Yu-gang, TANG Chun-sen, WANG Zhi-hui

(Automation College of Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: In a contactless power transfer (CPT) system, a constant current determines the stability and power transfer capability of the entire system. We focused on track current constant control problems with load changes. We analyzed the influence of load changes on track current and acquired several factors influencing track current. We put forward a piecewise control strategy for phase shifting angle control in primary circuits of CPT systems. We conducted simulation experiments using MATLAB and Simulink. The simulation results indicate that the current stable time is less than 2 ms before and after switching, and show that the control method can control track current constant effectively.

Key words: contactless power transfer; current control; piecewise control; shifting-phase angle

随着非接触电能传输(contactless power transfer, CPT)技术的不断发展^[1-5],非接触电能传输设备不断实用化。相对单负载工作的非接触电能传输系统而言,多负载拾取的非接触电能传输系统在工作过程中,由于负载的切换使得次级回路反射到初级回路的反射阻抗发生变化,从而导致初级回路的导轨电流发生变化,使系统无法在额定条件下正常工作。

CPT 系统常用的主电路拓扑结构有电流型谐振逆变器和电压型谐振逆变器两种^[6-7]。与电压型谐振逆变器相比,采用电流型谐振逆变器的 CPT 系统在拾取负载变化时会影响初级回路导轨电流的变

化,因此要恒定初级回路的导轨电流必须采取相应的措施。对于这种结构,通常其全桥逆变器的控制方法是两对功率开关管互补导通,在逆变器输入电压及耦合参数一定的情况下,这种控制方式无法实现对原边导轨电流的调节,通常的做法是在逆变器前串联一个 DC/DC 环节来调节逆变器电压^[8],从而改变原边导轨电流,这样既增加了系统的成本,又降低了系统的效率及可靠性。笔者在对负载切换时造成初级回路的导轨电流变化机理分析的基础上,提出了采用新型的智能分段控制算法^[9],解决多负载切换过程中初级回路的导轨电流变化问题,使得系统能在额定条件下稳定运行,从而克服了串联

收稿日期:2008-03-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777071)

作者简介:孙跃(1960-),男,重庆大学教授,主要从事电子电力技术及控制技术研究,(Tel)023-65111779;
(E-mail)syue06@cqu.edu.cn。

DC/DC 环节带来的不足,最后对基于智能分段控制算法的系统进行了仿真。

1 系统初级回路导轨电流的因素分析

CPT 系统有 2 个功能模块组成^[10-11]:初级谐振变

换电路和次级电能拾取电路如图 1 所示。初级谐振变换电路的主要功能是把直流电能变成高频电能。为了得到初级导轨电流的恒定,电流控制器通过对电流检测器检测到的实际电流信号与参考值比较,经过电流控制器进行调节,最后得到恒定的导轨电流。

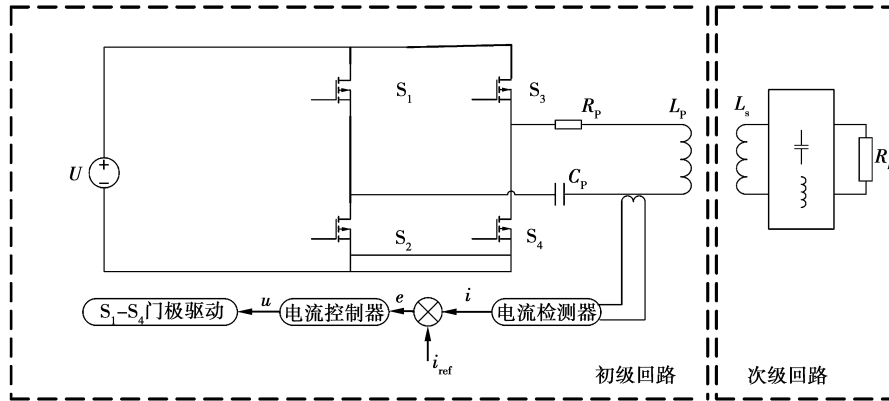


图 1 带恒流控制的 CPT 系统原理图

图 2 是初级高频谐振逆变器移相控制信号。在移相控制信号作用下图 1 的初级回路归纳起来共有图 3 所示的 4 种工作模式。

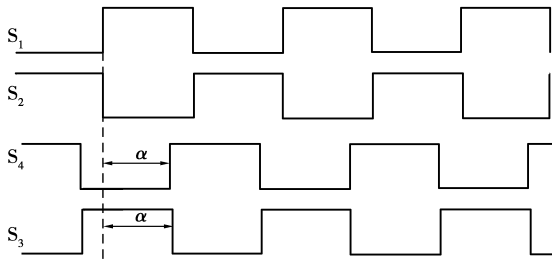


图 2 移相 PWM 控制信号

图 3 中 L_p 为传输电缆自身电感; R_p 为电缆自身电阻; C_p 为初级回路调谐电容; $-j\omega MI_p$ 为主电路导轨电流在拾取线圈中产生的互感电动势,它是受导轨电流控制的受控电源; L_s 为拾取线圈电感; C_s 为次级回路谐振电容; R_L 为用电设备等电阻(用电设备可能为感性、容性、阻性或三者的组合,这里只讨论阻性的情况)。次级回路采用谐振工作模式,且其固有频率是统一的、固定不变的^[12-13]。 Z_{es} 为次级回路反射到初级回路的反射阻抗,其值

$$Z_{es} = \frac{\omega^2 M^2}{\frac{L_s R_L}{L_s + R_L^2 C_s} + j \frac{L_s \sqrt{L_s C_s}}{(L_s + R_L^2 C_s) C_s}}, \quad (1)$$

式中 M 为耦合系数。

根据图 3 中 CPT 系统的 4 种工作模式,对初级回路列写方程

$$u(t) = \left(R_p + Z_{es} + j\omega L_p - j \frac{1}{\omega C_p} \right) \cdot i(t) \quad t \in (\alpha, T + \alpha). \quad (2)$$

对式(1)在 $t \in (\alpha, T + \alpha)$ 进行积分,根据图 3 可得

$$\alpha = \frac{T}{4} - \frac{I_p}{U} \left\{ \left(R_p + \frac{\omega^2 M^2 C_s R_L}{L_s} \right) + j \left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} - \frac{\omega^2 M^2 \sqrt{L_s C_s}}{L_s} \right) \right\}, \quad (3)$$

其中: T 为控制信号的工作周期; I_p 为导轨电流的幅值; U 为直流电压源。

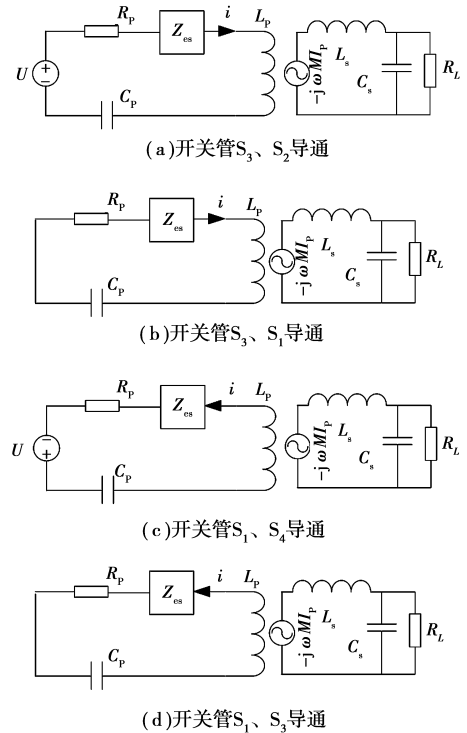


图 3 CPT 系统 4 种工作模式的等效电路图

在给定的初级发射机构和次级拾取机构的情况下,系统的 R_p 、 L_p 、 C_p 、 L_s 、 C_s 、 M 都为定值。适当调节移相 PWM 控制信号的频率,即 ω 的大小,使得系

统处于谐振工作模式,可得 $\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} - \frac{\omega^2 M^2 \sqrt{L_s C_s}}{L_s} = 0$, 相应的式(2)可简化为

$$I_p = \frac{U \left(\frac{\pi}{2\omega} - \alpha \right)}{\left(R_p + \frac{\omega^2 M^2 C_s R_L}{L_s} \right)}. \quad (4)$$

由上述分析可知,当多负载工作时,由于某一负载移除,必然会导致 R_L 的变化,从而造成初级回路上导轨电流的不恒定。所以,必须采取一定的措施使得初级回路导轨电流恒定,使系统稳定地运行。笔者采用智能分段控制算法来控制移相角 α 的变化,移相角 α 与负载 R_L 之间的关系如图 4 所示。当负载切换导致 R_L 变化的同时通过改变移相角 α 的大小,从而稳定 I_p 的值,达到恒流的目的。

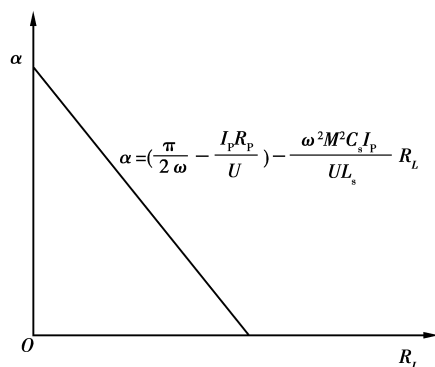


图 4 移相角 α 与负载 R_L 之间的关系图

2 智能分段控制算法的恒流措施

由于 CPT 系统的多静态工作模式,特别是系统参数的非线性、时变性和不确定性,很难建立精确的数学模型,而传统的 PID 控制算法又是对对象传递函数模型以及参数有着很大的依赖性,从而限制了 PID 控制在 CPT 系统上的应用^[14]。通过对 CPT 系统的特殊性和复杂性以及调节量导轨电流的振荡特性分析,电流控制器采用智能分段控制算法,其基本控制思想是当控制系统的控制误差趋于增大时,加大控制器的控制力度,抑制误差的增加,即进入强控制段;而当误差开始下降时,控制器控制力度减弱,即弱控制段;同时,控制器不断记忆偏差的极值,校正控制器的控制点,以适应变化的要求^[15]。

依据智能分段控制算法的基本控制思想,以 e 、 \dot{e} (e 为误差; \dot{e} 为误差变化率)为坐标轴建立控制器的工作平面,误差相平面上的特征及相应的控制模式如图 5 所示。当系统误差处于误差相平面的第二与第四象限,即 $e \cdot \dot{e} < 0$ 或 $e=0$ 且 $\dot{e} \neq 0$ 时,控制器工作于保持控制模式,即 $u(e, \dot{e}) = u_0$ 。当系统误差处于误差相平面的第一与第三象限,根据误差 e 的大小进行分段调节比例系数,使得误差 $e \rightarrow 0$ 。

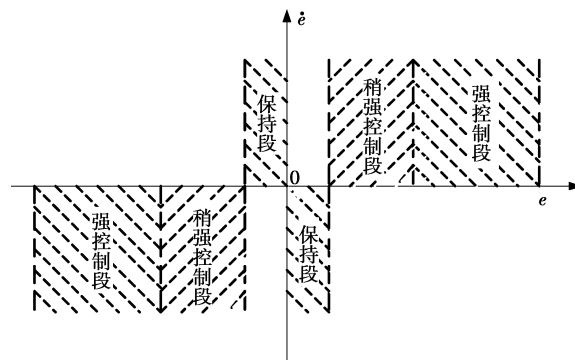


图 5 误差相平面上的特征及相应的控制模式

2.1 保持段

当误差 $|e| < \frac{e_m}{C_H}$ ($e > 0$ 时 $\dot{e} < 0$, $e < 0$ 时 $\dot{e} > 0$,

即 $e \cdot \dot{e} < 0$) 时,控制器处于保持段。

$$u(e, \dot{e}) = u_0, \quad (5)$$

式中: u 为控制器输出函数; e_m 为最大误差; u_0 为控制器的前一状态输出。

2.2 稍强控制段

当 $m < |\Delta y| < n$ 且 $\frac{e_m}{C_H} < |e| < \frac{e_m}{C_L}$ (C_H, C_L 为

常数, $C_H > C_L > 0$, $e \cdot \dot{e} > 0$) 时,控制器处于稍强控制段。

$$u(e, \dot{e}) = u_0 + c, \quad (6)$$

其中: Δy 为输出变化率; $m > 0, n > 0; c$ 为常数。

2.3 强控制段

当误差 $\frac{e_m}{C_L} < |e| < e_m$ ($e > 0$ 时 $\dot{e} > 0$, $e < 0$ 时

$\dot{e} < 0$, 即 $e \cdot \dot{e} > 0$) 时,控制器处于强控制段。

$$u(e, \dot{e}) = au_0 \left(1 \pm \left| \frac{e}{e_m} \right| \right), \quad (7)$$

式中 a 为比例系数。

对于智能分段控制算法中的各常数值确定,如 C_H, C_L, a, c 等并没有明确的数学计算公式,往往根据设计者的经验而定。在系统对调节时间有很高的要求时,可改变各分段误差取值范围的大小,用 C_{H1} 和 C_{H2} ($C_{H1} \neq C_{H2}$) 取代 C_H , 这样保持段的区间为 $|e| < \frac{e_m}{C_{H1}}$, 稍强控制段的区间为 $m < |\Delta y| < n$ 且 $\frac{e_m}{C_{H2}} < |e| < \frac{e_m}{C_L}$, 由于 $C_{H1} \neq C_{H2}$, 使得保持段和稍强控制段有一段空间,从而相应地减少了调节时间。

3 仿真分析

仿真的主要参数为: $L_p = 31.6 \mu\text{H}$, $C = 2 \mu\text{F}$, $L_s = 270 \mu\text{H}$, $C_s = 0.23 \mu\text{F}$ 。图 6 给出了在 50 ms 时刻,当负载变化率为 60% 时,导轨电流有效值的变化情况。

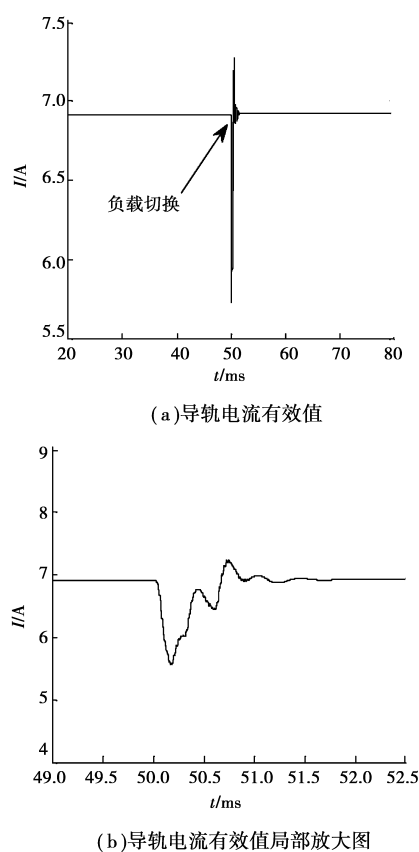


图6 导轨电流变化情况

从图6中可以看出,当CPT系统从双负载切换到单负载工作时,通过智能分段控制算法的调节,系统原边的导轨电流在负载切换掉之后能很快地稳定在未切换掉之前的电流值,其调节时间不到1 ms,结果表明采用分段控制算法的仿真结果与理论分析相符合,能很好地恒定导轨电流值。

4 结 语

从前面的理论分析和仿真结果可以知道,CPT系统在负载切换前后会造成原边导轨电流的变化,从而影响系统的拾取功率,使得系统无法在额定条件下工作。通过采用智能分段控制算法来改变移相角 α 达到恒流的目的,并且得到仿真验证。

参考文献:

- [1] HIDEKI A, HIROSHI N, HIROMI I. A highly efficient contactless electrical energy transmission system[J]. Wiley Inter Science, 2004, 35(10): 66-74.
- [2] JANG Y, JOVANOVIĆ M M. A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 520-527.
- [3] CHOI B, NHO J, CHA H, et al. Design and implementation of low-profile contactless battery charger using planar printed circuit board windings as energy transmission device[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 140-147.
- [4] 孙跃,杜雪飞,戴欣,等. 非接触式移动电源新技术[J]. 电气自动化, 2003, 11(5): 11-13.
- [5] 戴欣,孙跃. 单轨行车新型供电方式及相关技术分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2003, 26(1): 50-53.
- [6] DAI XIN, SUN YUE. Novel power supply method and technology analysis for electrified monorail system[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2003, 26(1): 50-53.
- [7] WANG C S, COVIC G A, STIELAU O H. Investigating an LCL load resonant inverter for inductive power transfer applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 995-1001.
- [8] SUN Y, HU P, DAI X, et al. Discrete time mapping modeling and bifurcation phenomenon study of a zvs converter[C]// Power Con. Singapore: [s. n.], 2004: 21-25.
- [9] 李爱文,张承慧. 现代逆变技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] 李祖枢,涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [11] 秦海鸿,王慧贞,严仰光. 非接触式松耦合感应电能传输系统原理分析与设计[J]. 电源技术应用, 2004(5): 257-262.
- [12] QIN HAI-HONG, WANG HUI-ZHEN, YAN YANG-GUANG. Analysis and design of contactless loosely coupled inductive power transfer system[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2004(5): 257-262.
- [13] 武瑛,严陆光,徐善纲. 新型无接触电能传输系统的稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 63-66.
- [14] WU YING, YAN LU-GUANG, XU SHAN-GANG. Stability analysis of the new contactless power delivery system[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(5): 63-66.
- [15] 孙跃,王智慧,戴欣,等. 非接触电能传输系统的频率稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 56-59.
- [16] SUN YUE, WANG ZHI-HUI, DAI XIN, et al. Study of frequency stability of contactless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 56-59.
- [17] 韩腾,卓放,王兆安,等. 非接触电能传输系统频率分岔现象研究[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(2): 44-47.
- [18] HAN TENG, ZHUO FANG, WANG ZHAOAN, et al. Study of frequency bifurcation phenomenon of a contact-less power transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(2): 44-47.
- [19] 孙跃,戴欣,苏玉刚,等. 广义状态空间平均法在CMPS系统建模中的应用[J]. 电力电子技术, 2004, 38(3): 86-88.
- [20] SUN YUE, DAI XIN, SU YU-GANG, et al. Modeling of CMPS system by generalized state-space averaging method[J]. Power Electronics, 2004, 38(3): 86-88.
- [21] WANG C S, COVIC G A. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148-157.

(编辑 李胜春)