

变论域自适应模糊控制在机器人无线充电中的研究

程志远,方聪,李峥,吴龙飞,赵雨顺

(上海电力大学 电气工程学院,上海 200090)

摘要:电能供给是保证机器人正常工作的重要环节。现有机器人充电方式多为接触式充电,该方式存在着漏电、易产生火花等重大安全隐患。而无线充电技术是一种非物理接触式传能方式,克服了现有充电方式的弊端,同时且具有自动化程度高、环境适应性强等优点。以串并补偿结构为研究对象,首先建立系统传递函数模型;其次考虑到无线充电系统具有非线性、高阶次及强耦合的特点,采用误差、误差变化率及输出论域可随系统参数变化而实时调整的变论域自适应模糊控制策略,使得系统具有控制精度高、自适应强和鲁棒性好等优点。最后通过仿真和实验结果验证了所提出的控制策略的有效性及其实用性。

关键词:机器人;无线充电;变论域自适应模糊控制

中图分类号:TM724 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22005

Research on Adaptive Fuzzy Control Based on Variable Universe in Wireless Charging of Robots

CHENG Zhiyuan, FANG Cong, LI Zheng, WU Longfei, ZHAO Yushun

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China)

Abstract: Power supply is an important link to ensure the normal operation of the robot. Most of the existing robot charging methods are contact charging, which have major safety hazards such as electric leakage and easy sparking. The wireless charging technology is a non-physical contact energy transmission method, which overcame the shortcomings of the existing charging method, and have the advantages of high degree of automation and strong environmental adaptability. Therefore, the series-parallel compensation structure was took as the research object. Firstly, the system transfer function model was built. Secondly, considering the characteristics of the wireless charging system with nonlinearity, high order and strong coupling, the adaptive fuzzy control based on variable universe was adopted, the error, error change rate and output domain could be adjusting in real time as the system parameters change in this control strategy, the strategy was making the system has the advantages of high control accuracy, strong adaptability and good robustness. Finally, simulations and experiments were carried out to prove the effectiveness and practicability of the proposed control strategy.

Key words: robots; wireless charging; adaptive fuzzy control based on variable universe

现代智能机器人技术日趋成熟,已经在众多领域中担任着重要的角色。多数机器人的充电方式仍为传统的接触式充电,在恶劣的工作环境中充电时易有漏电和产生火花等危险,而无线充电技术是一种非接触式能量传递方式^[1-3],能够解决机器人充电时存在的安全隐患。因此,机器人无线充电技术会在工业、海底及易燃易爆等场景

中有很好的应用价值^[4]。

目前,有关无线充电的控制策略较多。文献[5]基于Buck和Boost两种模式,结合电流型非接触电能传输(contactless power transfer, CPT)系统特性提出了一种灵活控制系统传输功率的电路拓扑;文献[6]通过使用一种零电压开关全桥DC/DC变换器降低了开关损耗和电磁干扰滤波器的

基金项目:国家自然科学基金(Z2018-050)

作者简介:程志远(1977—),男,博士,高级工程师,Email:chengzhiyuan@126.com

设计难度;文献[5-6]控制策略都需要增加一级直流变换环节。文献[7]采用一种串并/串谐振补偿结构,系统采用定频控制时,该结构在全负载范围内具备接收端输出恒压特性;文献[8]设计了LCL-LC/LCL型混合补偿拓扑电路,通过开关切换副边补偿结构实现恒压或恒流输出;文献[7-8]控制策略改变了系统的拓扑结构,会使无线充电系统的电路结构变得更加复杂。文献[9]通过利用双电源,采取协调控制抑制了功率波动,但由于双电源的引入,将会增大系统的控制难度。上述的控制策略虽然能够达到目标控制效果,但由于添加了额外电路或改变了电路拓扑结构,会使整个系统的鲁棒性、自适应性及控制精度略有降低。

文献[10]最早提出了变论域自适应模糊控制策略,由于该控制策略具有不依赖精确的数学模型、鲁棒性强、控制精度高、规则自生成和自调整、几乎无超调等优点,文献[11]将变论域自适应模糊控制策略应用于压铸机控制系统,实现了精确有效控制电液伺服阀及压射速度动态响应平稳且无超调的目的;文献[12]将其应用于永磁同步电机中,证明了该方法具有动态响应快、抗干扰能力和鲁棒性强等优点;文献[13]将其应用于液压转向系统中,结果证明了变论域自适应模糊控制几乎无稳态振荡现象,使得系统具有更好的转向性能。上述控制系统均为复杂的非线性系统,考虑到无线充电系统工作在高频谐振、松耦合电磁环境下,使得无线充电系统具有非线性、高阶次及强耦合的特点,常规的控制方法很难达到理想的控制效果,而采用传统的模糊控制器存在着稳态误差较大等问题,因此,文章针对机器人无线充电系统设计变论域自适应模糊控制策略。

文章首先对无线充电进行了建模分析,为自适应模糊控制器建立了模型基础;其次设计机器人无线充电系统的变论域自适应模糊控制器;最后通过仿真和实验结果验证了所建模型的正确性和控制方法的有效性。

1 系统建模

补偿结构是无线充电系统的重要组成部分,基本结构有串联补偿和并联补偿,在原边、副边均可使用。但原边使用并联补偿结构,在失谐情况时,高频逆变电路中的开关管会产生大电流,需要再串联电感来抑制这种情况,如此会增加系

统成本和控制难度;若是在副边使用并联补偿结构,电流谐振会具有电流源的特性,比较适用于充电系统^[4]。故文章以串并补偿结构为研究对象。

图1为串并补偿结构的等效电路图。其中 u_1 与 u_2 分别为原边输入电压和副边输出电压, C_p 与 C_s 分别为原边和副边补偿电容, L_p 与 L_s 分别为松耦合变压器原边和副边电感, R_p 与 R_s 分别为原边和副边内阻, R_L 为副边负载, i_L 为负载电流, i_p 与 i_s 分别为原边和副边谐振电流, u_{cp} 为原边补偿电容两端电压, i_{cs} 为副边补偿电容电流。

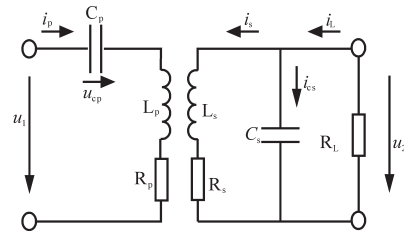


图1 串并补偿结构等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of serial-parallel compensation topology

图1中的原、副边补偿电容 C_p 、 C_s 可根据文献[14]给出的推导公式得出。副边补偿电容为

$$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_s} \quad (1)$$

原边补偿电容为

$$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 (L_p - \frac{M^2}{L_s})} \quad (2)$$

式中: ω_0 为系统谐振时的工作频率; M 为互感。

由图1可知,原、副边电压平衡时的方程为(由于内阻 R_p 、 R_s 很小,计算时忽略不计)

$$\begin{cases} u_1 = u_{cp} + \frac{d\Psi_p}{dt} \\ u_2 = \frac{d\Psi_s}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d\Psi_p}{dt} = u_1 - u_{cp} \\ \frac{d\Psi_s}{dt} = u_2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中相应的磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_p = L_p i_p + M i_s \\ \Psi_s = L_s i_s + M i_p \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{d\Psi_p}{dt} = L_p \cdot \frac{di_p}{dt} + M \cdot \frac{di_s}{dt} \\ \frac{d\Psi_s}{dt} = L_s \cdot \frac{di_s}{dt} + M \cdot \frac{di_p}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} i_p = i_{cp} = C_p \frac{du_{cp}}{dt} \\ i_s = i_L - i_{cs} = i_L - C_s \frac{du_2}{dt} \\ i_L = \frac{u_2}{R_L} \end{cases} \quad (5)$$

设电感、电容的初始能量为零,对式(3)~式(5)进行拉普拉斯变换并整理可得:

$$\begin{cases} s\Psi_p(s) = u_1(s) - u_{cp}(s) \\ s\Psi_s(s) = u_2(s) \\ s\Psi_p(s) = L_p \cdot sI_p(s) + M \cdot sI_s(s) \\ s\Psi_s(s) = L_s \cdot sI_s(s) + M \cdot sI_p(s) \\ I_p(s) = C_p(s) \cdot sU_{cp}(s) \\ I_s(s) = I_L(s) - C_s \cdot sU_2(s) \\ I_L(s) = \frac{U_2(s)}{R_L(s)} \end{cases} \quad (6)$$

结合式(6)及式(1)、式(2)可推导出系统传递函数为

$$G(s) = \frac{k^2}{C_s \cdot M \cdot (1 - k^2)} \cdot \frac{s^2}{s^4 + \frac{\omega_0^2 \cdot L_s}{R_L} \cdot s^3 + \omega_0^2(1 + \frac{1}{1 - k^2}) \cdot s^2 + \frac{\omega_0^4 L_s}{R_L} \cdot s + \omega_0^4} \quad (7)$$

式中: k 为松耦合变压器的耦合系数。

参考文献[14],可得 k 为

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (8)$$

2 变论域自适应模糊控制器的设计

在无线充电系统中,由于其工作在高频谐振、松耦合的电磁环境下,使得无线充电系统具有非线性、高阶次及强耦合的特点,常规的控制方法很难达到理想的控制效果,因此文章采用了鲁棒性和自适应性较强的模糊控制。同时考虑到传统模糊控制存在着控制精度较低的特点,文章最终采用了变论域自适应模糊控制,使得控制系统具有控制精度高、自适应强和鲁棒性好等优点。

首先,设 $X_i = [-E_i, E_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$)为输入变量 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)的论域, $Y = [-U, U]$ 是输出变量 y 的论域, E_i 和 U 均为正实数,是 x_i 和 y 的初始论域; $A_i = \{A_{ij}\} (1 \leq j \leq m)$ 是 X_i 上的模糊划分, $B = \{B_j\} (1 \leq j \leq m)$ 是 Y 上的模糊划分。模糊控制规则为

$$\begin{aligned} &\text{if } x_1 = A_{1j} \text{ and } x_2 = A_{2j} \text{ and } \dots \text{ and } x_n = A_{nj} \\ &\text{then } y = B_j, j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

式中: x_{ij} 为 A_{ij} 的峰点; y_j 为 B_j 的峰点。

本系统所设置的控制规则如表1所示。根据文献[10]的结论,模糊逻辑系统表现为一个 n 元片段差值函数 $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_n) = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \triangleq \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij}(x_i) y_j \quad (10)$$

表1 模糊控制规则表
Tab.1 Fuzzy control rules

U	EC						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NM	NB	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO
NS	NM	NM	NM	NM	ZO	PS	PS
E	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PM	PM	PM	PM
PM	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	PB

在控制过程中,系统的误差 e 及误差变化率 ec 随着控制的进行是不断减小的,如若接着使用初始论域,将会导致控制精度下降,因此,在控制过程中,我们需要对论域进行不断调整。变论域自适应模糊控制就是通过对论域 X_i 与 Y 随着变量 x_i, y 的变化自适应调整,记为

$$\begin{cases} X_i(x_i) = [-\alpha_i(x_i)E_i, \alpha_i(x_i)E_i] \\ Y(y) = [-\beta(y)U, \beta(y)U] \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\alpha_i(x_i), \beta(y)$ 为论域的收缩因子,变化前的论域称为初始论域。论域伸缩变化图如图2所示。

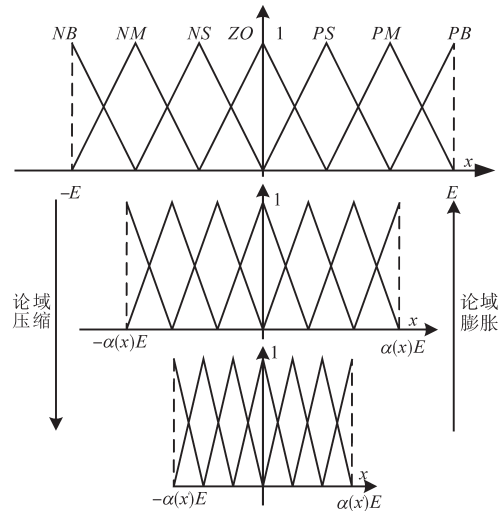


图2 论域的伸缩变化

Fig.2 The change diagram of domain constricting and expanding
一般来讲伸缩因子 $\alpha, X \rightarrow [0, 1], x \rightarrow \alpha(x)$ 满足下述条件:

- 1)对偶性: $\forall x \in X, \alpha(x) = \alpha(-x)$;
- 2)避零性: $\alpha(0) = \varepsilon$ (ε 是很小的正实数);
- 3)单调性: $\forall x_1, x_2 \in X$, 若 $|x_2| > |x_1|$, 有 $\alpha(x_2) > \alpha(x_1)$;
- 4)协调性: $\forall x \in X, |x| \leq \alpha(x)E$;

5)正规性: $\alpha(\pm E) = 1$ 。

控制系统是随着时间动态运行的,所以需要把基础变量变为时间的函数的形式,则可表示为如下的 n 元分片动态差值函数:

$$y[x(t+1)] = \beta\{y[x(t)]\} \sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n A_{ij} \left\{ \frac{x_i(t)}{\alpha_i[x_i(t)]} \right\} y_j \quad (12)$$

其中

$$x(t) \triangleq [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$$

由此可见, $\alpha[x_i(t)], \beta[y_j(t)]$ 对于控制系统的性能起到了极为重要的作用。因此我们需要选择适合系统的论域伸缩因子。

常用的比例因子有两种,分别是比例型伸缩因子和指数型伸缩因子,表达式分别为

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^\tau \quad \tau > 0 \quad (13)$$

$$\alpha(x) = 1 - \lambda e^{-kx^2} \quad \lambda \in (0,1), k > 0 \quad (14)$$

由文献[15]可知,比例型伸缩因子对论域有很大的压缩作用,由于压缩作用大,故控制规则的等效再生量大,因此控制精度会大幅度提高;但是由于等效规则产生过多会导致变论域自适应模糊控制器运算量过大,严重影响系统的实时性。指数型伸缩因子虽然对论域的压缩作用较小,控制精度会略差于比例型伸缩因子,但实时性很好。

针对文章具体的无线充电模型以及常规模糊控制器,并综合考虑该系统的控制精度及实时性之间的关系,文章以指数型伸缩因子作为研究对象,并确定:

$$\alpha(x) = \beta(y) = 1 - 0.001e^{-0.8x^2} \quad (15)$$

无线充电系统的变论域自适应模糊控制系统结构图如图3所示。

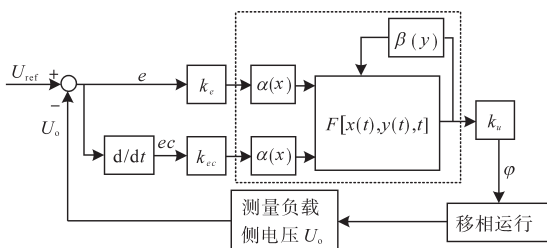


图3 变论域自适应模糊控制结构框图

Fig.3 Structure block diagram of variable universe adaptive fuzzy control

选取给定电压值 U_{ref} 和负载侧输出电压值 U_o 的偏差 e 及偏差的变化率 ec 为模糊控制器的输入,通过量化因子 k_e 和 k_{ec} 的映射成为模糊论域,后经过变论域自适应模糊控制器(图3中虚线框

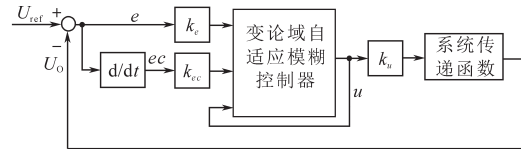
内即为变论域自适应模糊控制器)的处理,引入比例因子 k_u ,最终输出为移相角 φ ,测量负载侧电压 U_o 后再进行下一次的控制循环,直至 U_o 达到给定电压值 U_{ref} 。

3 仿真与实验验证

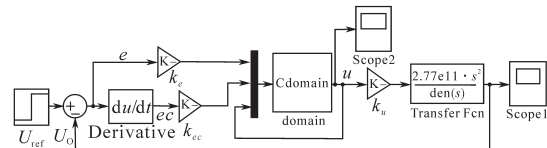
为了验证所提出的变论域自适应模糊控制策略的有效性,以系统实测所得参数搭建Simulink仿真模型如图4所示。相关系统参数为:额定功率500 W,负载 15Ω ,原边电感 $68.6 \mu\text{H}$,副边电感 $68.9 \mu\text{H}$,互感 $41.7 \mu\text{H}$,原边补偿电容 $81 \mu\text{F}$,副边补偿电容 $51 \mu\text{F}$,气隙30 mm。

在Matlab中模糊逻辑工具箱不能进行变论域操作,故必须编写S函数来进行论域的变换。首先在软件中建立M文件,先用S函数编写好传统的模糊控制算法,再加入设计的伸缩因子 $\alpha(x) = \beta(y) = 1 - 0.001e^{-0.8x^2}$ 变论域自适应模糊控制器的S函数片段为

```
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
lmd = 0.01;
k = 0.8;
a = newfis('fuzzy Cdomain');
%添加隶属度函数、模糊规则,此处省略
a = addrule(a,rulelist); %添加模糊规则函数
a1 = setfis(a,'DefuzzMethod','centroid'); %模糊特性
e = u(1)*(1-lmd*exp(-k*u(1)^2));
if e>6 e = 6;end
if e<-6 e = -6; end
ec = u(2)*(1-lmd*exp(-k*u(2)^2));
if ec>6 ec = 6;end
if ec<-6 ec = -6;end
in = [e,ec];
sys = evalfis(in,a1)*(1-lmd*exp(-k*u(3)));
if sys>7 sys = 7;end
if sys<-7 sys = -7;end
```



(a)结构框图



(b)仿真模型

图4 变论域自适应模糊控制结构框图及仿真模型

Fig.4 Simulation model and structure block diagram of variable universe adaptive Fuzzy control

图4的仿真模型及结构框图是依据图3的变论域自适应结构框图所搭建,其中Cdomain为变论域自适应模糊控制器的S函数,控制器输入分别为给定电压 U_{ref} 与系统传函输出的副边输出电压 U_o 的偏差、偏差变化率及控制器的输出反馈,控制器的输出量与 k_u 相乘进入系统的传递函数,通过传函输出 U_o 与 U_{ref} 作差,进行下次控制循环,直至 $U_o=U_{ref}$ 。

为了确定模糊控制中各变量物理论域的选择范围,无线充电系统首先开环运行,在系统输入电压不变的情况下,各移相角对应的负载侧电压大小如图5所示。

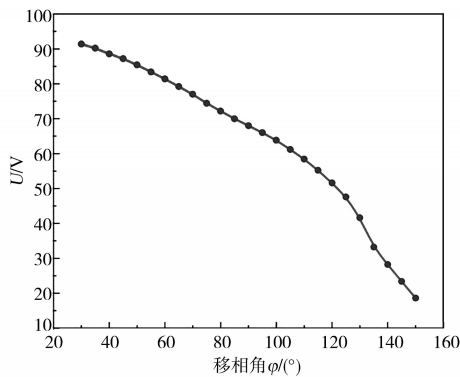


图5 负载侧电压随移相角的变化曲线

Fig.5 Variation curve of load side voltage with phase shift angle

根据图5负载侧电压随移相角的变化情况,定义 e 和 ec 的物理论域分别为: $e \in [-24, 24]$, $ec \in [-10, 10]$, 输出量 u 的物理论域为: $u \in [-7, 7]$, 令量化因子 $k_e=0.25$, $k_{ec}=0.625$, 则 e 和 ec 所对应的初始模糊论域 E 和 EC 均为 $[-6, 6]$ 。

图6为伸缩因子 $\alpha(x)=1$ (即为传统模糊控制)和 $\alpha(x)=1-0.001e^{-0.8x^2}$ (为变论域自适应模糊控制)时控制器输出波形。由于文章采用三角形隶属度函数,故输出波形均为三角形;当引入伸缩因子 $\alpha(x)=1-0.001e^{-0.8x^2}$ 时,输出波形发生了变化,证明论域已经在发生改变。

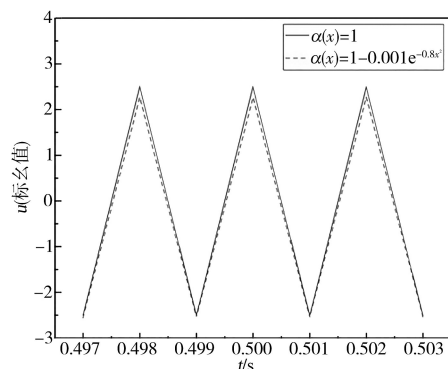


图6 变论域控制器的输出

Fig.6 Output of variable universe controller

图7分别为伸缩因子 $\alpha(x)=1$ 和 $\alpha(x)=1-0.001e^{-0.8x^2}$ 时副边负载的输出电压值波形。在文章的控制系统中,伸缩因子的引入对响应速度的快慢影响较小,但是伸缩因子对系统的控制精度有很显著的影响,变论域自适应模糊控制器在系统达到稳态后,几乎没有振荡。由此可见,变论域自适应模糊控制更适用于无线充电系统。

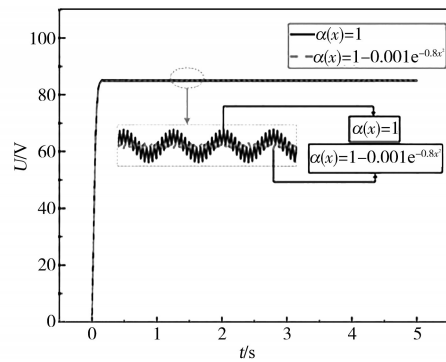


图7 传统模糊控制与变论域自适应模糊控制对比

Fig.7 Contrast between traditional fuzzy control and variable universe adaptive fuzzy control

为了验证所提出的变论域自适应模糊控制策略的有效性,搭建了如图8所示的500 W无线充电控制平台,主要由整流板、逆变板、AD采集板、主控板、液晶屏和LCT组成。

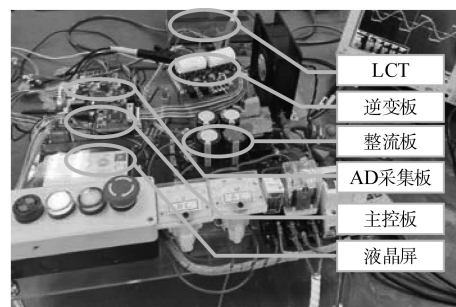


图8 无线充电控制平台

Fig.8 Control platform of wireless charging

图9为本文所设计的机器人无线充电系统变论域自适应模糊控制系统结构框图。其控制过程为:首先通过霍尔传感器获取负载两端电压 U_o , 经过ADC板采集后由无线模块将 U_o 传递至原边, 将 U_o 与给定电压 U_{ref} 的偏差 e 、偏差变化率 de/dt 及控制器输出反馈作为控制器的输入, 变论域自适应模糊控制器的输出为移相角 φ , 将其输入MOS驱动器, 通过改变高频全桥逆变器的移相角进而改变 U_o 值。如此反复, 直至 $U_o=U_{ref}$ 。

图10所示为逆变器输出电压和电流波形, 从图中可观察到, 电压和电流近乎于同相位, 说明前文中设计系统参数的方法是可取的, 系统的功

率因数接近于1。由于杂波电感的存在,导致逆变电压出现尖峰。

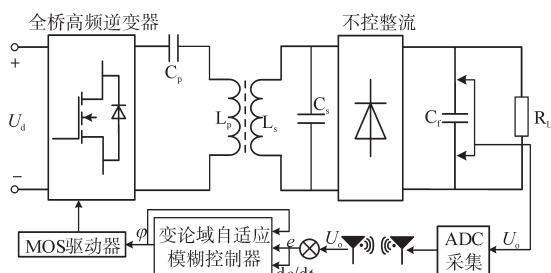


图9 变论域自适应模糊控制系统结构框图

Fig.9 Structural block diagram of variable universe adaptive fuzzy control system

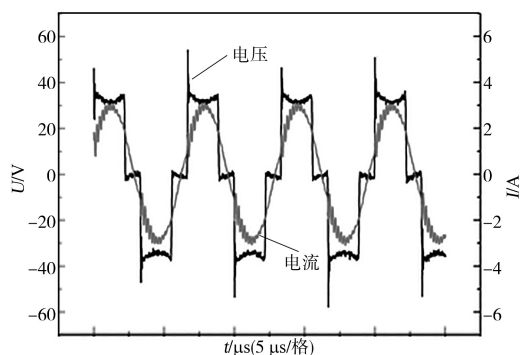


图10 逆变输出电压电流

Fig.10 Inverter output voltage and current

当系统工作输出为额定功率500 W时,系统的恒压输出应约为85 V。图11变论域自适应模糊控制策略下副边输出电压的稳态波形,最终的稳态输出电压为85 V左右,观察液晶屏,其移相角为 50° ,与开环实验所测试的移相角相吻合。

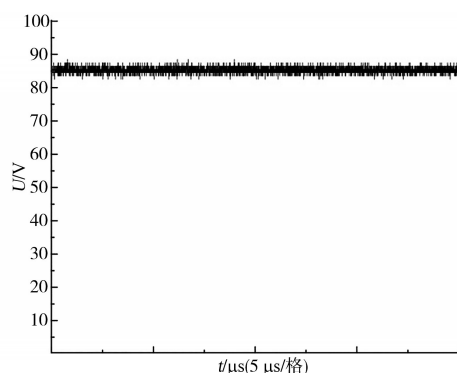


图11 副边输出稳态电压

Fig.11 Steady state voltage of secondary output

在本文设计的无线充电系统中,当输出额定功率为500 W时,测得系统输入电压 $U_{in}=201.3$ V,输入电流 $I_{in}=3.02$ A,该系统的传输转化效率 $\eta=P_{out}/P_{in}\approx 82\%$ 。系统的损耗包括电力电子器件开关损耗、松耦合变压器磁芯损耗和线圈损耗及一些杂散损耗等。

4 结论

文章针对无线充电系统设计了一种误差、误差变化率及输出论域可随系统参数变化而实时调整的变论域自适应模糊控制策略,使得系统具有控制精度高、自适应强和鲁棒性好等优点。通过仿真和所搭建的实验平台对所采用的控制策略进行了验证,结果表明该控制策略具有一定的有效性及实用性。

参考文献

- [1] 黄学良,谭林林,陈中,等.无线电能传输技术研究与应用综述[J].电工技术学报,2013,28(10):1-11.
Huang Xueliang, Tan Linlin, Chen Zhong, *et al.* Review and research progress on wireless power transfer technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10):1-11.
- [2] 宋凯,朱春波,李阳,等.基于磁耦合谐振的自主无线充电机器人系统设计[J].电工技术学报,2014,29(9):38-43.
Song Kai, Zhu Chunbo, Li Yang, *et al.* Design and implementation of an autonomous wireless charging robot system using magnetically coupled resonance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(9):38-43.
- [3] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠.磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J].中国电机工程学报,2013,1(3):1-12.
Zhao Zhengming, Zhang Yiming, Chen Kainan. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 1(3):1-12.
- [4] 田浩.面向移动机器人的低频无线充电技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
Tian Hao. Low-frequency wireless charging technology for mobile robot[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [5] 孙跃,王智慧,苏玉刚,等.电流型CPT系统传输功率调节方法[J].重庆大学学报,2009,32(12):1386-1391.
Sun Yue, Wang Zhihui, Su Yugang, *et al.* Power transfer regulation mode for current fed CPT system[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(12):1386-1391.
- [6] Safaee A, Jain P K, Bakhshai A. An adaptive ZVS full-bridge DC-DC converter with reduced conduction losses and frequency variation range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8):4107-4118.
- [7] 刘闯,郭赢,葛树昆,等.具备恒压特性的SP/S感应式无线电能传输系统[J].电工技术学报,2016,31(13):149-154.
Liu Chuang, Guo Ying, Ge Shukun, *et al.* The SP/S inductive power transfer system with constant voltage characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13):149-154.
- [8] 侯春,朱旺,水恒琪,等.基于LCL-LC/LCL混合补偿的多电

(下转第75页)

- [11] Zhang Z, Chen Y, Liu X, *et al.* Two-stage robust security-constrained unit commitment model considering time autocorrelation of wind/load prediction error and outage contingency probability of units[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 25398–25408.
- [12] 鲁卓欣,徐潇源,严正,等.不确定性环境下数据驱动的电力系统优化调度方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 172–183.
Lu Zhuoxin, Xu Xiaoyuan, Yan Zheng, *et al.* Overview on data-driven optimal scheduling methods of power system in uncertain environment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 172–183.
- [13] Bertsimas D, Litvinov E, Sun A, *et al.* Adaptive robust optimization for the security constrained unit commitment problem[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 28(1): 52–63.
- [14] Verástegui F, Lorca Á, Olivares D E, *et al.* An adaptive robust optimization model for power systems planning with operational uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4606–4616.
- [15] 林俐,潘险险,张凌云,等.基于免疫离群数据和敏感初始中心的K-means算法的风电场机群划分[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(20): 5461–5468, 5722.
Lin Li, Pan Xianxian, Zhang Lingyun, *et al.* The K-means clustering algorithm for wind farm based on immune outlier data and immune-sensitive initial center[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(20): 5461–5468, 5722.
- [16] 任建文,张青青.基于能源区块链的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(08): 23–33.
Ren Jianwen, Zang Qingqing. Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(8): 23–33.
- [17] Zhao C Y, Guan Y P. Data-driven stochastic unit commitment for integrating wind generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(4): 2587–2596.

收稿日期:2020-11-16

修改稿日期:2020-11-24

(上接第59页)

- 电动汽车恒流恒压无线充电系统特性分析[J]. *电工电能新技术*, 2018, 37(11): 58–68.
Hou Chun, Zhu Wang, Shui Hengqi, *et al.* Characteristic analysis of constant current and voltage wireless charging system for multi-electric vehicles based on LCL-LC/LCL hybrid compensation[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2018, 37(11): 58–68.
- [9] Tan L, Guo J, Huang X, *et al.* Coordinated source control for output power stabilization and efficiency optimization in WPT systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(4): 3613–3621.
- [10] 李洪兴.从模糊控制的数学本质看模糊逻辑的成功——关于“关于模糊逻辑似是而非的争论”的似是而非的介入[J]. *模糊系统与数学*, 1995, 9(4): 1–14.
Li Hongxing. To see the success of fuzzy logic from mathematical essence of fuzzy control——on the paradoxical success of fuzzy logic[J]. *Fuzzy Systems And Mathematics*, 1995, 9(4): 1–14.
- [11] 张叶茂,苏茜.基于变论域自适应模糊PID的压铸机压射速度控制研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(1): 68–72, 75.
Zhang Yemao, Su Qian. Research on die casting machine injection velocity control based on variable universe adaptive fuzzy PID[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(1): 68–72, 75.
- [12] 崔家瑞,李擎,张波,等.永磁同步电机变论域自适应模糊PID控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(S1): 190–194.
Cui Jiarui, Li Qing, Zhang Bo, *et al.* Permanent magnet synchronous motor of variable universe adaptive fuzzy PID control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(S1): 190–194.
- [13] 张闻宇,丁幼春,廖庆喜,等.拖拉机液压转向变论域模糊控制器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 43–50.
Zhang Wenyu, Ding Youchun, Liao Qingxi, *et al.* Variable universe fuzzy controller for tractor hydraulic steering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 43–50.
- [14] 程志远,朱春波,魏国,等.串-并补偿结构大功率感应充电系统谐振变换器[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(9): 44–48.
Cheng Zhiyuan, Zhu Chunbo, Wei Guo, *et al.* Resonant converter for high power ICPT system with series-parallel compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(9): 44–48.
- [15] 杨丽.变论域自适应模糊控制在机械手轨迹跟踪中的应用研究[D].成都:西南石油大学,2016.
Yang Li. Research on the application of adaptive fuzzy control based on variable universe in manipulator trajectory tracking [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

收稿日期:2020-06-03

修改稿日期:2020-06-10