

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003020

EAST 快控电源灰色预测均流控制研究^{*}

黄海宏 韦友龙 王海欣

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:应对超导托卡马克核聚变实验装置中等离子体的垂直位移快控电源大电流快速响应的要求,使用多组逆变单元并联运行方式。为克服电压模式下各支路参数不同导致各支路输出电流的不一致性,提出基于灰色预测模型的均流控制策略,用其预测下一刻电流上升率,实时动态调整各支路脉冲宽度调制(PWM)占空比,实现快控电源的均流控制。仿真与实验结果表明,基于灰色预测模型的均流控制策略使得各支路输出电流具有较好的一致性,验证了该算法在 EAST 快控电源上应用的可行性和有效性。

关键词:托卡马克;电压模式;灰色预测;均流控制

中图分类号:TL62;TN6 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**470.4031

Research on gray prediction current sharing control of EAST fast control power supply

Huang Haihong Wei Youlong Wang Haixin

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The method of multiple inverters paralleled is presented to meet the need of large current and fast control for the plasma vertical displacement power supply in the experimental advanced superconducting Tokamak. The current sharing control strategy based on gray prediction model in voltage mode is proposed to overcome the inconsistent output current of each branch, which caused by the different parameters of each branch. Current rising rate of each branch of next time can be predicted by this model and adjust PWM duty cycle dynamically in real time, thus current sharing control in voltage mode is achieved. Simulation and experimental results show that the current sharing control strategy based on gray prediction model can get relatively consistent output current of each branch, and the feasibility and the effectiveness of this strategy in EAST fast control power supply are verified.

Keywords: Tokamak; voltage mode; gray prediction; current sharing control

0 引言

地球上化石能源存量有限,以开发聚变能为目标的受控核聚变研究将极有可能为人类提供无限的清洁能源,而托卡马克(Tokamak)型环形磁约束装置被认为是最有希望首先建成商用聚变动力堆的核聚变装置。为了得到高参数的等离子体放电,现有的 Tokamak 装置多采用拉长非圆截面的等离子体位形^[1-2]。增大等离子体位形截面的拉长比可以提高磁场约束等离子体的能力,但拉长的等离子体存在垂直位移不稳定性,若不加控制,等

离子体在垂直方向上会沿着同一个方向运动,导致碰壁发生破裂,不但造成等离子体放电失败,且在破裂放电时会导致严重的甚至破坏性的高热负荷、高机械应力及大逃逸电子电流,有可能给装置带来很大的危害。因此, Tokamak 装置需要对等离子体的垂直位移进行反馈控制^[3-4]。

等离子体垂直位移反馈控制方式分为被动反馈和主动反馈。当等离子体发生垂直位移时,在真空室壁导体或人工放置的被动板上会感应出涡流,而感应的涡流会产生磁场,该磁场与等离子体电流相互作用产生洛伦兹力,该力与等离子体垂直位移的方向相反,这被称为被动

反馈。被动反馈控制一般用来降低等离子体垂直不稳定位移的增长率。

但是此被动反馈作用会因为导体电阻对涡流有耗散作用,且当这个过程超过导体扩散时间而大大衰减,此时需要使用主动反馈控制来针对大于被动导体的涡流损耗时间尺度的扰动^[5-6]。目前在 Tokamak 装置中通常会根据等离子体在垂直方向上的快速位移来控制主动反馈电源的输出信号,励磁线圈产生目标磁场,进而抑制等离子体的垂直位移。Tokamak 装置真空室外部极向场线圈可以产生控制等离子体垂直位移的磁场,但真空室壁对其产生的磁场有一定屏蔽作用,会造成磁场作用的延迟。目前已达成共识的解决方法是在真空室内设置独立的主动反馈线圈,通过外部电源对其进行快速励磁控制来实现对等离子体快速垂直位移的有效抑制。

EAST 装置是中国科学院等离子体物理研究所自行设计、研制的全超导 Tokamak 装置。其中快控电源是一种大容量 AC/DC/AC 单相大功率逆变电源($\pm 1\ 600\text{ V}/\pm 9\ 000\text{ A}$)^[7-8],其功能就是实时接收等离子体位形控制系统发送的指令信号,实时跟踪输入指令信号并进行线性放大,通过励磁控制主动反馈线圈来产生快速变化磁场,实现对等离子体的不稳定垂直位移进行有效抑制。

快控电源为实现高压和大电流输出,采用一个逆变支路由 3 个 H 桥级联,6 条支路通过均流电抗器并联的主拓扑,存在并联时各支路输出电压及线路阻抗参数的不一致而导致输出电流不均流问题。而因快控电源输出为无固定波形的快速变化电流,目前应用于大容量由若干逆变单元并联而成的通用正弦波逆变装置的均流技术均无法实现有效均流。

快控电源采用两种控制方式,电流模式和电压模式。电流模式中给定信号对应的是电源的输出电流,其对应关系为给定的 $\pm 10\text{ V}$ 对应电源输出电流 $\pm 9\ 000\text{ A}$ 。线性功率放大实时追踪给定信号的输出电流,使其成为一种电压源型逆变器,且具有电流源的特性^[9-10]。每个逆变单元通过采集各自支路的均流电抗器电流来实现闭环比例调节器的控制,此控制方式可有效实现各支路间的均流控制。从运行效果看,该模式对于输出电流有不错的控制精度,超调量较小,但响应速率存在不足。而电压模式为一种开环控制模式,其对应关系为给定的 $\pm 10\text{ V}$ 对应电源输出电压 $\pm 1\ 600\text{ V}$ 。电源每条支路输出电压的平均值相同且与给定信号呈线性关系。相较电流模式,电压模式有效提高了主动反馈线圈的电流建立速率,并在实验过程中取得了等离子体垂直不稳定位移方面优异的控制效果^[11]。

因快控电源各个支路上的参数存在不一致性,故在采用电压开环控制模式时会导致电流上升率的不

一致。为解决此问题,本文使用预测模型来预测下一时刻电流上升率,调整各支路的占空比来实现均流控制。

1 快控电源电压模式下均流控制策略

主动反馈线圈的回路方程如式(1)所示。

$$L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c + M_c \frac{di_c}{dt} + \frac{d}{dt}[M_p i_p] + M_a \frac{di_a}{dt} = V_c \quad (1)$$

式中: L_c 为主动反馈线圈的自感; R_c 为主动反馈线圈的等效电阻; i_c 为主动反馈线圈上的电流; M_c 为主动反馈线圈匝间互感; M_p 为等离子体环与主动反馈线圈的互感; i_p 为等离子体的电流; M_a 为被动板与主动反馈线圈的互感; i_a 为被动板上的电流; V_c 为主动线圈上外加的控制电压。由式(1)可知,EAST 主动反馈线圈上的电压平衡方程十分复杂,线圈上的电流不仅与主动反馈线圈的电阻、自感和互感相关,还与被动反馈导体和等离子体的电流与主动反馈线圈产生的互感相关,所以简单地使用电源输出电压和线圈的自身参数来进行建模就不能对电源的输出电流进行很好的预测,可行的方案是通过电源输出电流值进行轨迹预测。

传统预测方法需要采集大量的样本数据,并且这些数据需要有一定分布规律,但是由于托卡马克装置中等离子体垂直不稳定性所带来的平衡位置偏移事件的规律性不强,而使得快控电源所给定信号与反馈信号同样都是规律性不强,因此在此快速电源系统中无法发挥作用。

20 世纪 80 年代初,邓聚龙提出灰色预测理论。此理论面向不确定系统,从已知数据中提取开发有价值的信息,对系统的趋势和状态进行预测。灰色预测理论自提出以来至今,已经被广泛的使用在很多领域。其中灰色 GM(1,1)模型是单序列的一阶线性模型,应用最广泛。其核心思想就是把原始的数据序列进行生成开发,降低随机扰动成分影响,找出其中指数增长规律,最后通过微分方程逼近拟合。文献[12]将灰色预测模型应用于板级焊点可靠性评估,提出利用多特征参数融合的特征提取方法和灰色模型的故障预测方法,实现对焊点剩余使用寿命的有效预测。文献[13]将灰色预测模型应用于电网多母线短期负荷预测,提出一种基于灰色模型 GM(1,1)和 Kalman 平滑器的多母线短期负荷预测方法,有效地降低预测误差。文献[14]建立了多电平逆变器闭环控制的非线性动态行为模型,通过灰色模型 GM(1,1)对多电平逆变器输出信号测量值在线新陈代谢灰色滤波及单步预测,实现了多电平逆变器的 PID 预测控制。

灰色系统理论的 GM(1,1) 模型对于样本数据的数量和规律没有过多的限制,通过生成开发实际中选取的适量原始数据序列,消除随机扰动等成分影响,分析并找出系统中隐藏的增长规律,从而预测下一阶段的趋势和状态,综合考虑目前 EAST 快控电源控制器采样速率、输出电流变化频率和预测控制的快速性和准确性,可根据 4 个采集数据对第 5 个数据进行预测。具体方法为对于电源的输出电流采样信号进行提升,每条支路均采用电流传感器对电流进行采集,并经过调理电路得到非负信号,获得由 4 个采集数据组成的采集数据序列 $X^{(0)}$, $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), x^{(0)}(4)\}$ 进而获得累加数据序列 $X^{(1)}$:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), x^{(1)}(4)\} \quad (2)$$

其中:

$$x^{(1)}(n) = \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \quad n = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

利用 $X^{(1)}$ 构造背景值序列 $Z^{(1)}$:

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), z^{(1)}(4)\} \quad (4)$$

其中, $z^{(1)}(n) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1)]$, $n = 2, 3, 4$ 。

鉴于电源控制器采样频率(30 kHz)远高于其输出电流信号变化频率(500 Hz),即输出信号相对于采样频率来说变化较缓慢, $X^{(1)}$ 满足式(5)。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (5)$$

式中: a 为反映 $X^{(1)}$ 发展态势的发展系数; b 为反映数据变化关系的灰色作用量。采用最小二乘法,根据式(6)和(7)分别得到 a 和 b :

$$a = \frac{\sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) \sum_{k=2}^4 x^{(0)}(k) - 3 \sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) x^{(0)}(k)}{3 \sum_{k=2}^4 [z^{(1)}(k)]^2 - [\sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k)]^2} \quad (6)$$

$$b = \frac{\sum_{k=2}^4 x^{(0)}(k) \sum_{k=2}^4 [z^{(1)}(k)]^2 - \sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) \sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k) x^{(0)}(k)}{3 \sum_{k=2}^4 [z^{(1)}(k)]^2 - [\sum_{k=2}^4 z^{(1)}(k)]^2} \quad (7)$$

求得式(5)的模型解为:

$$\hat{x}^{(1)}(m) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-a(m-1)} + \frac{b}{a} \quad m = 1, 2, \dots, 5 \quad (8)$$

采用累减还原,即式(3)的逆变换,得到式(9)所示的还原值 $\hat{x}^{(0)}(m)$ 。

$$\hat{x}^{(0)}(m) = \hat{x}^{(1)}(m) - \hat{x}^{(1)}(m-1) \quad m = 2, 3, \dots, 5 \quad (9)$$

当式(9)中 $m = 5$ 时, $x^{(0)}(5)$ 是使用采样数据 $x^{(0)}(1) \sim \hat{x}^{(0)}(4)$ 计算出来下一采样时刻的预测值, $x^{(0)}$

中的 4 个采集数据会随着实时的采样实时更新,由此预测值 $\hat{x}^{(0)}(5)$ 也会实时更新。

通过 GM(1,1) 预测模型计算出来的预测值 $\hat{x}^{(0)}(5)$, 通过式(10)计算出下一时刻各支路的电流上升率:

$$\frac{dx^{(0)}(5)}{dt_5} = \frac{\hat{x}^{(0)}(5) - x^{(0)}(4)}{\Delta t} \quad (10)$$

先比较其大小各条支路电流上升率的大小,再选择上升率最大的支路。假设第 1 条支路电流上升率最大,则对第 1 条支路的输出占空比不改变,再根据式(11)对其他各条支路进行占空比调整。

$$D_m = \frac{u_m + \hat{x}_1^{(0)}(5)r_m + L_m \frac{d\hat{x}_1^{(0)}(5)}{dt_5}}{U_{in}} \quad (11)$$

式中: U_{in} 为直流侧电压; D_m 为第 m 条支路 H 桥的导通占空比; u_m 为第 m 条支路中功率开关管导通压降; r_m 为第 m 条支路的等效电阻; L_m 为第 m 条支路的等效电感。其对应每条支路的等效电路如图 1 所示。

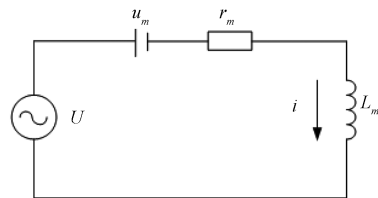


图 1 单条支路的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of a branch

考虑到 u_m 、 r_m 、 L_m 均为未知量,故需要推算求解。在快控电源对电压信号进行跟踪时, DSP 的采样速率远远高于给定信号的变化频率,故可以认为在预测过程中,各支路的等效电感、等效电阻以及功率开关管的导通压降等近似为定值。选取第 1 条支路,并选择 3 个采样数据序列,根据式(12)写出方程组。

$$\begin{cases} U_{in} \cdot D_1(t_{on1}) = u_1 + x_1(1) \cdot r_1 + L_1 \cdot \frac{dx_1(1)}{dt_1} \\ U_{in} \cdot D_1(t_{on2}) = u_1 + x_1(2) \cdot r_1 + L_1 \cdot \frac{dx_1(2)}{dt_2} \\ U_{in} \cdot D_1(t_{on3}) = u_1 + x_1(3) \cdot r_1 + L_1 \cdot \frac{dx_1(3)}{dt_3} \end{cases} \quad (12)$$

可根据方程组求解出第 1 条支路的开关管导通压降 u_1 、支路电阻 r_1 和支路电感 L_1 参数。其他支路按照同样的方法求解各自支路的参数。此时,根据式(11)可以对其他各条支路进行占空比调整。

以此类推,再下一时刻时,其他各条支路都以预测电流上升率最大的那条支路为基准,在给定信号决定的占空比基础上进行微调输出占空比,从而能够在

开环电压模式各支路参数不一致的情况下实现均流控制。

2 仿真

MATLAB 中,在快速逆变电源系统的仿真模型中加入灰色预测模型 GM(1,1) 进行电压模式下的均流控制。仿真中,给定一个频率为 100 Hz 的方波信号,其幅值大小为 ± 5 V,各支路参数进行差异设置。当未加入均流控制 GM(1,1) 模型算法时,系统输出的电流波形如图 2 所示。图 2 方波是给定信号,其余 3 条斜率不一样的波形是支路电流波形。从图 2 可以明显观测出,3 条支路电流上升率不一致,从而导致这 3 条支路输出的电流波形没有很好的一致性。

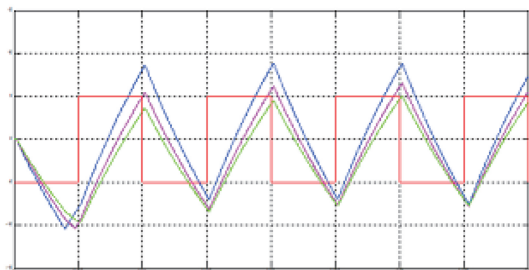


图 2 无均流控制的电压模式输出波形

Fig. 2 Waveform of voltage mode without current sharing control

图 3 所示为加入均流控制 GM(1,1) 模型算法电压模式时的电源系统输出的电流波形,同样,方波为同样的给定信号,但是可以明显看出得是,3 条支路的电流上升率基本上保持一致,输出的电流波形有很好的一致性,从而验证了均流控制算法的有效性。

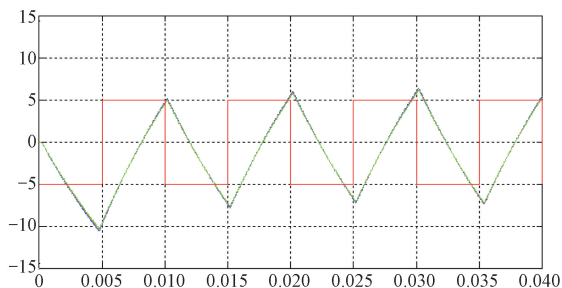


图 3 有均流控制的电压模式输出波形

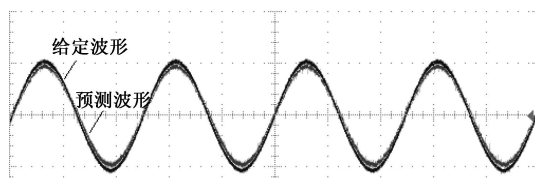
Fig. 3 Waveform of voltage mode with current sharing control

3 实验

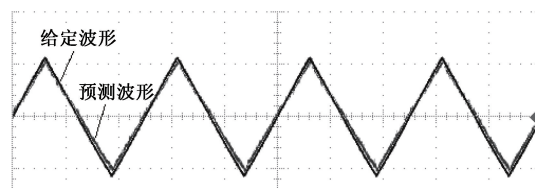
首先进行灰色预测模型 GM(1,1) 对给定信号的预测实验。采用以 TMS320F28335 型 DSP 为主控芯片,输

入信号通过信号发生器输出,使用外扩 SPI 及模数转换模块实时输出预测波形,从而将给定输入波形和输出的预测波形进行比较^[15]。

实验中的正弦波和三角波通过信号发生器输出,其输入幅值为 ± 5 V、频率为 100 Hz。在系统中,输入的给定信号经灰色预测模型计算后,通过数模转换模块 DAC 转换为预测信号。图 4 所示为实验波形,图 4(a) 为给定正弦波信号和对应预测波形,图 4(b) 为给定三角波信号和对应预测波形。



(a) 正弦波
(a) Sine wave



(b) 三角波
(b) Triangle wave

图 4 预测控制输出实验波形

Fig. 4 Experiment waveform with predictable control

通过实验波形图 4 可以明显观测到,针对不同输入信号,实验中采用的电源控制器中应用灰色 GM(1,1) 模型,都能够较准确地预测出相对应的输入信号。

通过上述在电压模式下加入基于灰色预测模型的均流控制算法的理论分析及 MATLAB 仿真的基础上,本文设计了并联控制程序对比验证加入均流控制算法前后的控制效果。实验中,给定一个频率为 100 Hz 的方波信号,其幅值大小为 ± 3 V。

未加入均流控制 GM(1,1) 模型算法的各支路输出电流波形如图 5 所示,通道 1 是给定方波波形,3 条支路的电流输出波形分别对应 2、3、4 通道,从波形图中明显可以观测到 3 条支路的释出电流波形一致性很差。加入均流控制 GM(1,1) 模型算法的各支路输出电流波形如图 6 所示,可以看出加入均流控制算法后,3 条支路其输出电流波形有很好的一致性,验证了均流控制算法的有效性。

4 结论

在电压模式下,以灰色预测模型理论为基础,提

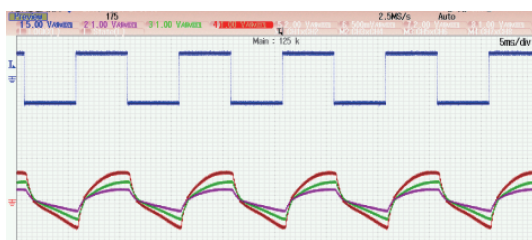


图5 无均流控制的电压模式输出波形

Fig. 5 Waveform of voltage mode without current sharing control

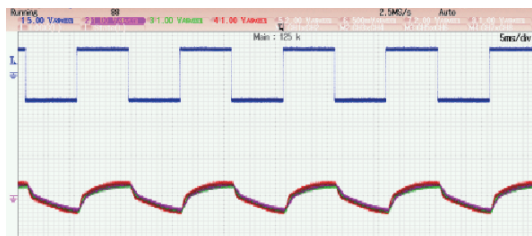


图6 有均流控制的电压模式输出波形

Fig. 6 Waveform of voltage mode with current sharing control

出一种均流控制的算法。通过 $GM(1,1)$ 模型预测电路上升率最大的一条支路作为基准,对其他两条支路输出占空比进行调整,实现各支路输出电流波形的一致性。

由仿真和实验结果可知,基于灰色预测模型的电压模式下均流控制算法,使得逆变电源各支路输出电流波形具有较好的一致性,验证了此算法在快速逆变电源上应用的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 谭胜均. EAST 上由垂直不稳定性引发破裂的分析与预测[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.
TAN SH J. Analysis and prediction of disruption induced by vertical instability on EAST [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [2] 刘磊. EAST 垂直位移被动稳定及主动控制模拟与实验研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.
LIU L. The simulation and experiment study of passive stability and active control for EAST vertical instability [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [3] CHEN D L, SHEN B, QIAN J P, et al. Observation and analysis of Halo current in EAST[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(6): 387-391.
- [4] 汪悦航. EAST 等离子体位形控制优化及系统辨识[D]. 合肥:中国科学技术大学,2018.
WANG Y H. EAST shape and position control optimization and system identification [D]. Hefei:

University of Science and Technology of China, 2018.

- [5] 王海欣,汪凤凤,黄海宏,等. EAST 等离子体垂直不稳定位移主动反馈控制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013,33(4):342-347.
WANG H X, WANG F F, HUANG H H, et. al. Active feedback control of vertical instability displacement of East plasma [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2013,33(4):342-347.
- [6] 胡云鹏,鲍晓华,张程,等. EAST 快控电源中空芯电抗器磁热耦合分析(英文)[J]. 电气工程学报, 2017, 12(4): 1-9.
HU Y P, BAO X H, ZHANG CH, et. al. Magnetic-thermal coupling analysis of air-core reactor in EAST fast control power supply [J]. Journal of Electrical Engineering, 2017, 12(4): 1-9.
- [7] HUANG H H, CHENG W, WANG H X, et al. Development of new fast control power supply for EAST [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23(5): 1808-1813.
- [8] HUANG H H, XU R B, GAO G. Power supply of vertical stability coil in EAST [C]. Conference on Modelling, Identification and Control, 2012.
- [9] 黄海宏,毕楠夏,俞佳,等. 新 EAST 快控电源电压模式的探索[J]. 核聚变与等离子体物理, 2017, 37(3): 331-335.
HUANG H H, BI N X, YU J, et. al. Exploration of voltage mode of the new fast control power supply for EAST[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2017, 37(3):331-335.
- [10] 王海欣,黄海宏,高格,等. 载波移相在大容量并联逆变电源中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(11): 1054-1059.
WANG H X, HUANG H H, GAO G, et al. Application of phase-shift PWM in large capacity multi-inverters in parallel [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(11): 1054-1059.
- [11] HUANG H H, BI N X, WANG H X. The analysis and experimental research of the second-generation EAST active feedback power supply [J]. Fusion Engineering and Design, 2018(126): 174-179.
- [12] 景博,陈珪君,盛增津,等. 多特征融合灰色模型的板级焊点寿命预测研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 72-79.
JING B, CHEN Y J, SHENG Z J, et. al. Research on life prediction of board-level solder joints based on fusion of multi-feature parameters and gray model [J].

- Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 72-79.
- [13] 魏少岩, 吴俊勇. 基于灰色模型和 Kalman 平滑器的多母线短期负荷预测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 158-162.
- WEI SH Y, WU J Y. Short-term bus load forecasting based on gray model and Kalman smoother [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 158-162.
- [14] 黄海宏, 杨增仁, 王海欣. 基于灰色预测模型的多电平逆变器的预测控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(12): 1126-1130.
- HUANG H H, YANG Z R, WANG H X. Prediction control of multilevel inverter based on gray model[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(12): 1126-1130.
- [15] 汪凤凤, 黄海宏, 王海欣. EAST 快控电源灰色预测 PID 控制预研[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 604-610.
- WANG F F, HUANG H H, WANG H X. Pre-research on gray prediction PID control of EAST fast control power supply [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 604-610.

作者简介



automation.



power transmission.



黄海宏, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为电力电子技术和自动控制。

E-mail: hhaihong741@126.com

Huang Haihong is a professor at Hefei University of Technology now. His main research interests include power electronics and

韦友龙, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail: 2019110307@mail.hfut.edu.cn

Wei Youlong is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include power electronics and

王海欣, 1998 年在东南大学获学士学位, 2009 年在合肥工业大学获硕士学位, 主要研究方向为 DSP 应用技术。

E-mail: w_haixin@126.com

Wang Haixin received B. Sc. from Southeast University in 1998, and M. Sc. from Hefei University of Technology in 2009. Her main research interest is application technology of DSP.