

基于 RBF-PID 的超导变压器励磁电源控制系统研究^{*}

张舒庆^{1,2}, 刘方^{2†}, 李童², 李方逸², 秦经刚²

1. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601;

2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

收稿日期: 2019-11-15; 接收日期: 2019-12-21

【摘要】 超导体测量装置中的超导变压器由于次级线圈接头电阻的损耗会引起次级电流的衰减, 为了克服次级电流衰减的影响, 改善超导变压器的输出性能, 对超导变压器原理进行分析, 建立超导变压器数学模型, 采用一种基于 RBF-PID 算法对超导变压器励磁电源进行控制. 在 MATLAB/Simulink 中搭建超导变压器控制系统仿真模型, 结果表明, 与传统 PID 控制系统相比, RBF-PID 控制系统的响应速度更快, 超调量更小, 鲁棒性能更好.

关键词: RBF 神经网络, 超导变压器, RBF-PID

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.008

Research on Control System of Superconducting Transformer Excitation Power Based on RBF-PID

ZHANG Shuqing^{1,2}, LIU Fang², LI Tong², LI Fangyi², QIN Jinggang²

1. *Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;*

2. *Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

Received date: 2019-11-15; accepted date: 2019-12-21

【Abstract】 Attenuation in the secondary current may occur in superconducting transformer of the superconducting conductor measuring device due to the resistance loss of secondary coil joints. In order to overcome the influence of secondary current reducing and improve output performance of the superconducting transformer, the author of this paper analyzes principles of superconducting transformer, sets up the mathematical model of superconducting transformer, adopts the RBF-PID algorithm to control the excitation power supply of superconducting transformer. By establishing simulation model of superconducting transformer control system in MATLAB/Simulink, results show that compared with traditional PID control system, the RBF-PID control system comes with faster response, smaller overshoot and better robustness.

Keywords: RBF neural network; Superconducting transformer; RBF-PID

PACS: 7460, 7490, 0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.06.008

Reference method: ZHANG Shuqing, LIU Fang, LI Tong, LI Fangyi, QIN Jinggang, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0421 (2019)

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项资助(No. XDB250020200)资助的课题.

[†] fangliu@ipp.ac.cn

1 引言

随着聚变技术的发展,人们对超导导体的性能有着越来越高的要求,对于超导体性能测试的需求也大大增加.世界各国纷纷建立起超导体测试装置,用于超导体在不同温度和磁场环境下的临界电流性能研究^[1].目前,超导体测量装置所需的千安级别大电流主要是采用可调电流源通过超导变压器放大后产生.因此,发展相关的超导变压器技术对超导体性能测试的研究有着重要的意义^[2].

我国中科院等离子体物理研究所依托中国科学院重大科研装备课题研制出一套 50 kA—10 T 的大型超导综合测试装置^[3,4].装置内部的 50 kA 超导变压器通过超导接头与超导样品相连接,为超导体性能测试提供所需的电流.目前,超导接头存在很小的阻值,在实际导体测量过程中会造成次级线圈的能量损耗,引发次级电流的衰减.当前主要是通过实验人员根据次级电流变化进行手动调整,难以将次级电流稳定在期望的目标范围内.本文针对超导体测试实验装置中超导变压器次级线圈电流稳定的问题,提出了一种基于 RBF-PID 算法的电源控制系统设计方法,设计一个闭环反馈控制方案,借助于 MATLAB 仿真建模能力,验证控制方案实施的合理性和可靠性,为下一步超导变压器控制系统的实际应用做好准备.

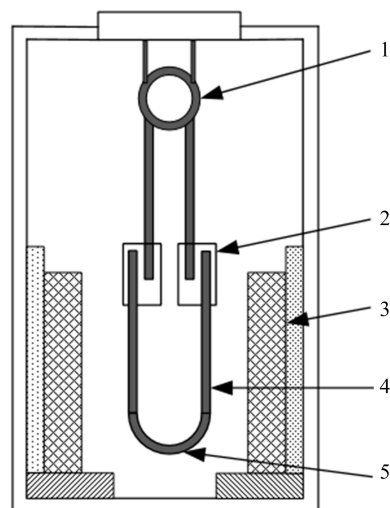
2 超导变压器模型

2.1 超导变压器工作原理

超导体测量装置结构如图 1 所示,超导变压器与被测样品相接后,放置于带有背场磁体的容器之中,用于进行超导体性能的测试.超导变压器主要由初级线圈、次级线圈和超导接头组成,初级线圈和外部的可控直流源连接构成初级回路,次级线圈通过超导接头和被测样品连接形成次级回路.当初级回路中的可控直流源以一定的速率励磁时,会在初级回路中产生变化的磁通,该磁通在次级回路中的线圈中感应出大电流,用于对超导体样品的性能进行测试.

2.2 超导变压器数学模型

根据超导变压器的工作原理^[5,6],对超导变压器模型进行分析,得到超导变压器等价电路图如图 2 所示. L_p 和 L_s 分别表示超导变压器的初级线圈



1. 初级线圈 2. 超导接头 3. 背场磁体 4. 次级线圈 5. 被测样品

图 1 导体的测量装置结构图

Fig. 1 Structure drawing of conductor measuring device

和次级线圈电感, M_{ps} 是初次级线圈之间的互感, R_p 为初级回路中的电阻, R_s 为次级回路中的电阻, L_L 为导体样品电感.

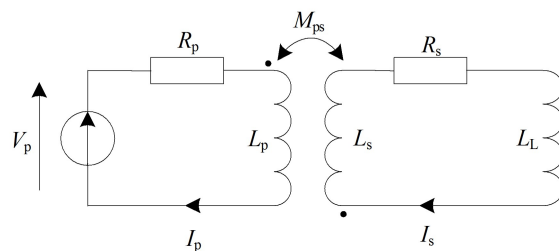


图 2 超导变压器等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of superconducting transformer

设初级线圈电流变化率为 c_1 ,当 $t=0$, I_s 从 0 开始时,根据电路的零状态响应,可以推算出 t 时刻次级线圈的电流值为:

$$I_s(t) = -\frac{M_{ps}c_1}{R_s}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

其中, $\tau = (L_s + L_L)/R_s$ 为时间常数.

当 $t=t_1$, $I_s = I_{st1}$ 时,改变初级电流的变化率为 c_2 ,根据电路的全响应,得到 $t(t > t_1)$ 时刻的次级电流为:

$$I_s(t) = -I_{st1}e^{-\frac{t-t_1}{\tau}} - \frac{M_{ps}c_2}{R_s}(1 - e^{-\frac{t-t_1}{\tau}}) \quad (2)$$

由公式(2)可以得到,当初级电流保持平顶状态时,即 c_2 为 0 时,次级电流会随着时间不断衰减,无

法维持当前的电流值. 如图 3 所示^[7], 为中科院等离子体物理研究所超导变压器在初级电流平时时次级电流变化曲线, 当初级线圈停止励磁时, 次级电流由 58 kA 衰减到 29.3 kA, 为超导体性能的测试带来诸多不利影响.

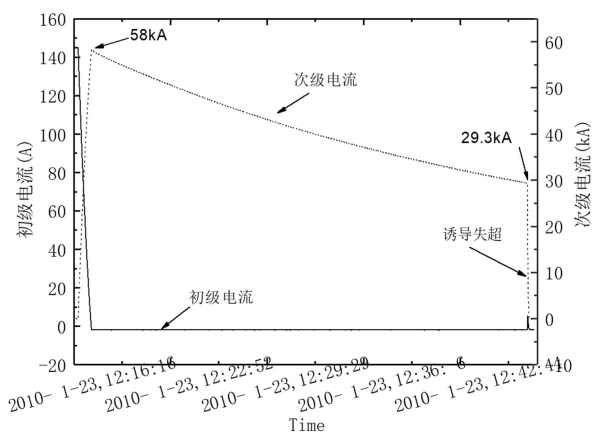


图 3 次级电流衰减图

Fig. 3 Attenuation diagram of secondary current

3 系统设计

3.1 方案设计

为解决超导变压器在初级电流平时时次级回路中的电流衰减问题, 根据超导变压器工作原理, 设计一个电源控制系统调节次级电流的变化. 如图 4 所示, 通过安装在次级线圈上的霍尔元件测得与次级电流对应大小的霍尔电压 V_{bg} , 控制系统根据转换关系式计算出次级电流, 调控励磁电源输出的初级电流变化速率, 补偿次级回路中电流的衰减, 维持次级电流的稳定, 其中 V_{ref} 为控制系统控制可控直流源的给定电压.

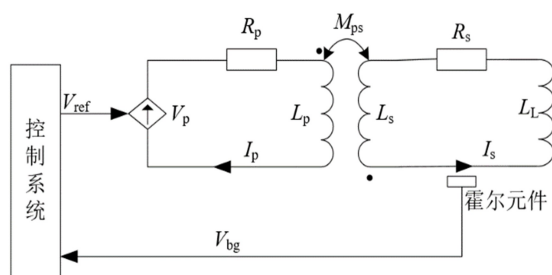


图 4 控制系统方案图

Fig. 4 Scheme diagram of control system

在工程应用之中, PID 控制的策略简单, 鲁棒性较好, 可靠性较高, 是闭环反馈系统中广泛采用的控制方案; 但其对数学模型要求很高, 难以应对系

统中的实时性及非线性, 需要人员不断调整控制参数, 消耗大量的人力资源, 且难以达到理想的效果^[8]. 针对传统 PID 存在的弊端, 专家学者们提出许多新的解决方案, 如将模糊理论与 PID 相结合的模糊 PID 控制, 神经网络与 PID 相结合的神经网络 PID 控制以及将专家系统与 PID 相结合的专家 PID 等, 这些都对传统的 PID 控制加以改进, 在实际应用之中有着很好的效果.

RBF-PID 控制算法是将 RBF 神经网络与传统 PID 控制相结合的智能控制算法, 利用 RBF 神经网络可任意逼近任意函数, 无需精确的数学模型特点^[9], 对传统的 PID 参数进行整定, 通过 RBF 神经网络辨识当前系统的非线性关系, 自动调节当前的 PID 控制参数, 达到预期的控制目标. 本文采用基于 RBF-PID 的自整定控制器, 控制系统能够对超导变压器内部的非线性有着很好的适应性, 快速的收敛性和较强的抗干扰性.

3.2 RBF 神经网络

RBF 神经网络是一种基于 RBF 函数的前馈型神经网络, 具有收敛快, 结构简单, 逼近能力强等特点. 主要由输入层、隐含层和输出层组成, 其中输入层为首层, 主要用于数据的输入; 隐含层为中间层, 用于对输入的数据进行函数运算; 最后一层为输出层, 对各隐含层的运算结果进行求和输出. 其结构示意图如图 5 所示.

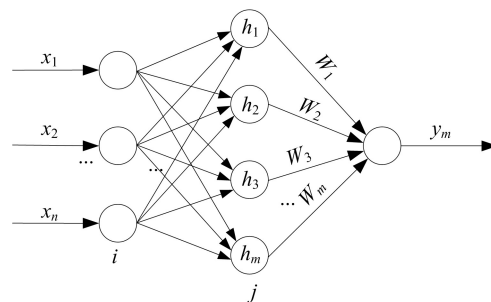


图 5 RBF 神经网络结构图

Fig. 5 The structure of RBF neural network

图中, $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 为网络的输入向量, $[w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ 为连接权值向量, $[h_1, h_2, \dots, h_m]^T$ 为径向基向量, 选取结构简单、对称性好的高斯函数作为径向基函数, 如式(3)所示.

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中, $C_j = [c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn}]$ 为第 j 个隐含层节点的

中心向量, b_j 为第 j 个隐含层节点的径向基函数的宽度, h_j 在隐含层节点中心处值最大, 在偏离节点中心后开始迅速衰减. 网络的输出为所有隐含层节点的代数运算和^[10], 表示式为:

$$y_m = \sum_{j=1}^m h_j \omega_j, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

网络辨识的性能指标函数为:

$$E(k) = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2 \quad (5)$$

根据梯度下降法, c_{ji}, b_j, ω_j 的调整方式为:

$$\Delta \omega_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_j} = \eta (y(k) - y_m(k)) h_j \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega_j(k) &= \omega_j(k-1) + \Delta \omega_j(k) + \\ &\alpha (\omega_j(k-1) - \omega_j(k-2)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta b_j &= -\eta \frac{\partial E}{\partial b_j} = \\ &\eta (y(k) - y_m(k)) \omega_j h_j \frac{\|x - c_j\|^2}{b_j^3} \quad (8) \\ b_j(k) &= b_j(k-1) + \Delta b_j(k) + \end{aligned}$$

$$\alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta c_{ji} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{ji}} = \eta (y(k) - y_m(k)) \omega_j h_j \frac{x - c_{ji}}{b_j^2} \\ c_{ji}(k) &= c_{ji}(k-1) + \Delta c_{ji}(k) + \end{aligned} \quad (10)$$

$$\alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (11)$$

其中, α 为变化范围 $[0, 1]$ 的动量因子, η 为变化范围 $[0, 1]$ 的学习系数.

Jacobian 矩阵为:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^m \omega_j h_j \frac{c_{ji} - \Delta u(k)}{b_j^2} \quad (12)$$

3.3 RBF 神经网络 PID 整定原理

利用 RBF 神经网络的自学习能力和非线性逼近特性, 与 PID 控制相结合. 利用 RBF 神经网络对 PID 控制参数 K_p, K_i, K_d 进行整定, K_p, K_i, K_d 能根据系统的变化实时调整, 调整输出值稳定在目标值范围内, 具体的系统结构图如图 6 所示.

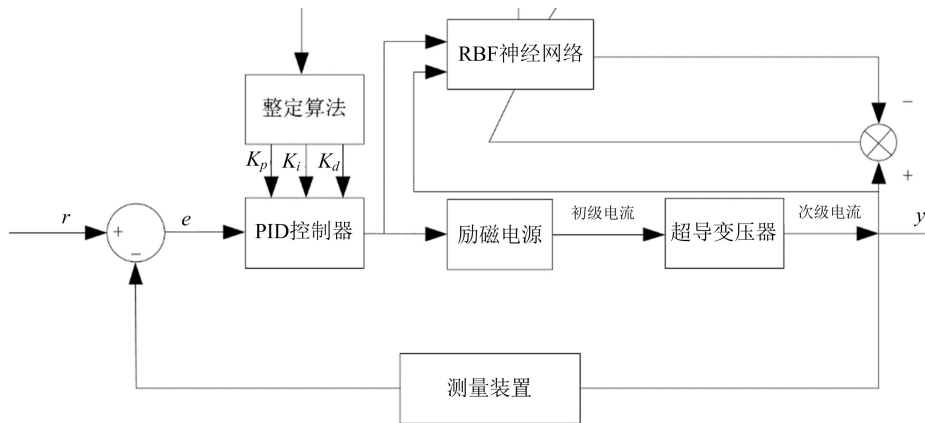


图 6 RBF-PID 系统结构图

Fig. 6 RBF-PID system structure

图中, PID 采用增量式控制器, 其控制算法为:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (13)$$

$$x_{c1}(k) = e(k) - e(k-1) \quad (14)$$

$$x_{c2}(k) = e(k) \quad (15)$$

$$x_{c3}(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= k_p x_{c1}(k) + k_i x_{c2}(k) + k_d x_{c3}(k) \\ &\quad (17) \end{aligned}$$

采用梯度下降法调节 PID 控制参数, 具体算法为:

$$\Delta k_p = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta_p \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p}$$

$$= \eta_p e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_{c1}(k) \quad (18)$$

$$\Delta k_i = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta_i \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_i}$$

$$= \eta_i e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_{c2}(k) \quad (19)$$

$$\Delta k_d = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta_d \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_d}$$

$$= \eta_d e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_{c3}(k) \quad (20)$$

上式中, η_p, η_i, η_d 为比例、积分、微分的学习速

率, $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为 RBF 神经网络辨识得到的 Jacobian 信息. 则 k_p 、 k_i 、 k_d 为:

$$k_p(k) = k_p(k-1) + \Delta k_p(k) \quad (21)$$

$$k_i(k) = k_i(k-1) + \Delta k_i(k) \quad (22)$$

$$k_d(k) = k_d(k-1) + \Delta k_d(k) \quad (23)$$

RBF-PID 控制的流程图如图 7 所示:

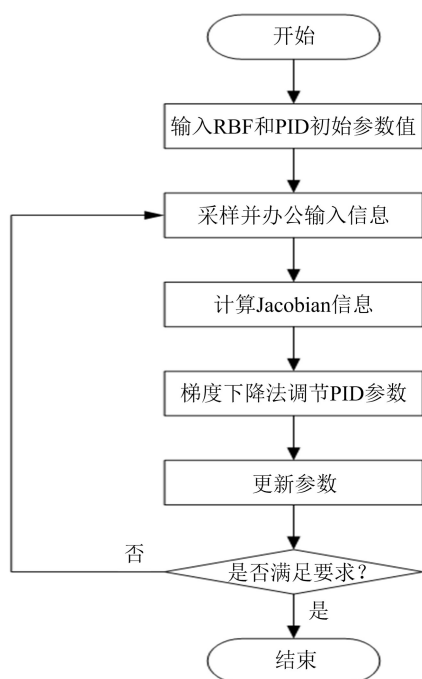


图 7 RBF-PID 控制流程图

Fig. 7 Flow chart of RBF-PID control

4 仿真分析

为了验证 RBF-PID 控制系统对改善超导变压器性能的效果, 进一步为超导变压器控制系统实际应用做准备, 以中科院等离子体物理研究所 50 kA 超导变压器的参数为基础, 在 MATLAB 中搭建模型, 进行仿真测试, 具体参数如表 1 所示.

表 1 50 kA 超导变压器参数

Table 1 Parameters of 50 kA superconducting transformer

Items (名称)	Primary coil (初级线圈)	Secondary coil (次级线圈)
Conductor(导体)	NbTi strand	NbTi CICC
Layers(层数)	16	1
Turns(匝数)	2336	4
Self-inductance(自感)	0.8 H	5.2 μ H
Coupling coefficient (耦合系数)	0.645	

设超导接头电阻为 5 n Ω , 样品电感为 0.5 μ H, 在次级电流为 29 kA 时开始补偿, 使次级线圈稳定在 30 kA, 则被控对象的数学模型为:

$$I_s(t) = -29000e^{-\frac{t}{1140}} - 275468c_2(1 - e^{-\frac{t}{1140}}) \quad (24)$$

建立控制系统的仿真模型如图 8 所示:

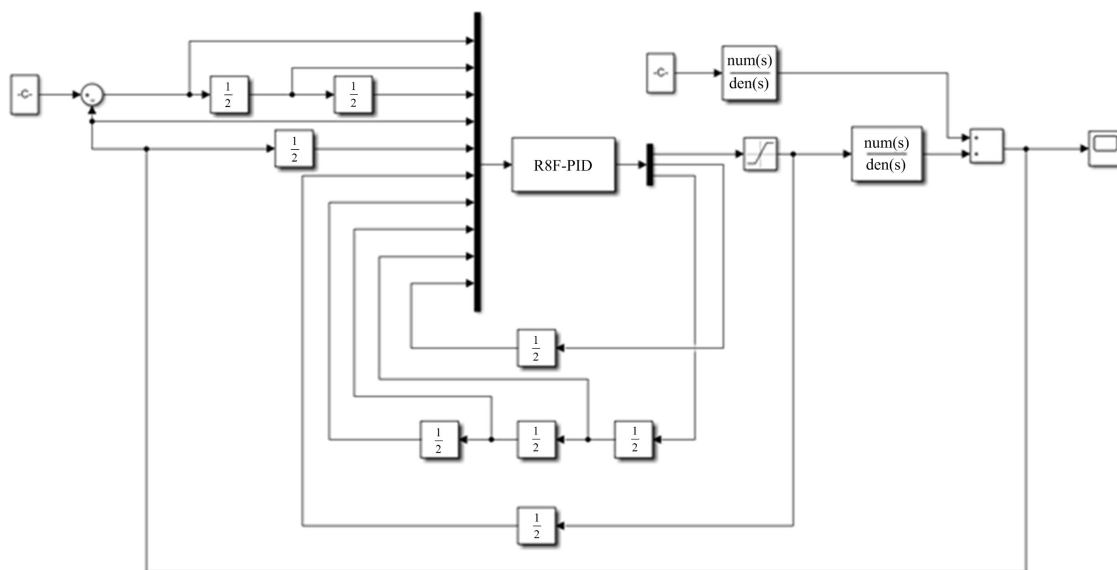


图 8 Simulink 仿真模型图

Fig. 8 Simulation model

RBF 的网络结构采取 3-6-1 模式, $u(k)$, $y(k)$, $y(k-1)$ 作为 RBF 函数的输入层参数, $y(k)$ 为输出层参数. 设置系统的动量因子和学习速率, 采样周期为 0.01 s. 仿真结果如图 9 所示, 初级电流变化率如

图 10 所示.

在 $t=200$ s 时加入幅值为 500 的扰动信号, 观察扰动情况下的控制效果, 结果如图 11 所示.

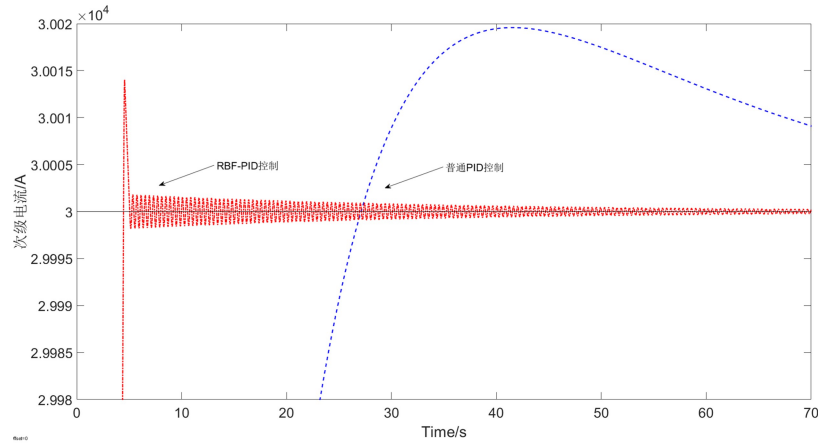


图 9 仿真结果图

Fig. 9 Simulation result

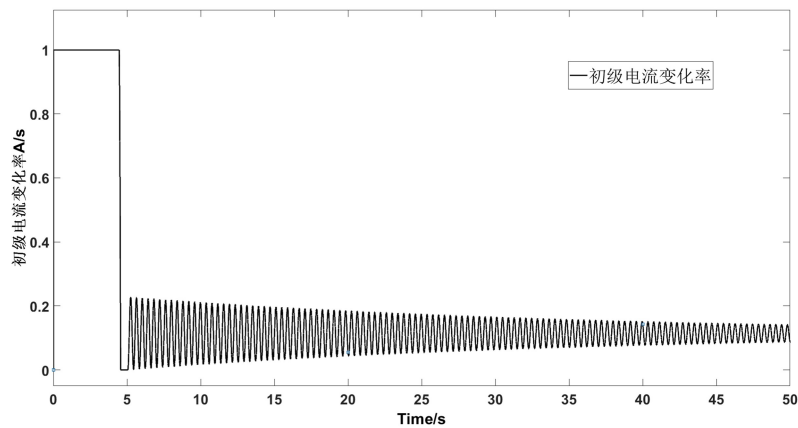


图 10 初级电流变化仿真结果图

Fig. 10 Simulation results of primary current change

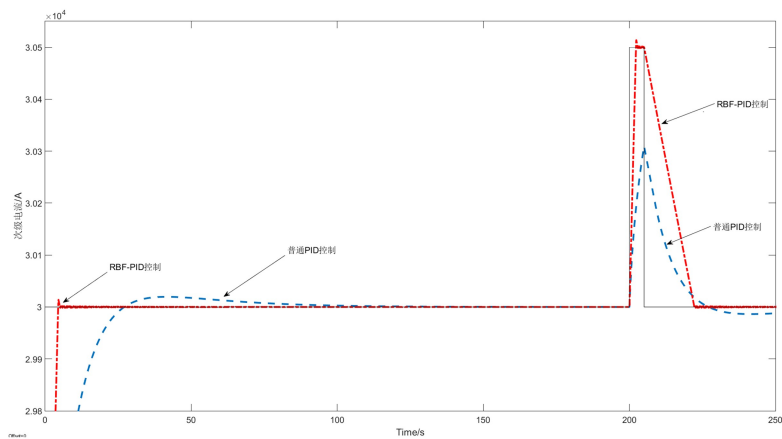


图 11 扰动情况下的仿真结果图

Fig. 11 Simulation results under disturbance

分析上述仿真结果,可以得到 RBF-PID 控制系统比传统 PID 控制系统具有更快的响应,在 $t=5\text{ s}$ 时进入误差为 10 A 范围内的误差带,传统的 PID 控制系统进入误差为 10 A 范围内的误差带则需要 66 s ,且 RBF-PID 控制系统的最大超调量远小于传统 PID 控制的最大超调量,在有扰动信号干扰的情况下,RBF-PID 控制系统比传统的 PID 控制系统具有更强的抗干扰性能,能够迅速恢复至干扰前的状态,具有更好的稳定性.

5 结 论

针对于超导导体测量装置中超导变压器次级电

流衰减的问题,文中对超导变压器进行模型分析,提出一种闭环反馈控制方案,通过调控初级电流变化率来补偿次级电流的衰减.并在控制系统中采用了 RBF-PID 控制算法,通过 RBF 算法的自学习能力整定合适的 PID 控制参数,解决了传统 PID 控制参数难以整定的问题.仿真结果表明,采用 RBF-PID 控制系统与传统 PID 控制系统相比,具有较快的收敛速度和较强的抗干扰和自适应能力,控制效果好,为进一步的控制系统实际应用做好了准备.

参 考 文 献

- [1] Godeke A, Dietderich D R, Joseph J, Lizarazo J, Prestemon S, Miller G, Weijers H W. *Physica C: Superconductivity*, **372**(2002),1688.
- [2] Godeke A, Dietderich D R, Joseph J, Lizarazo J, Prestemon S, Miller G, Weijers H W. *Review of Scientific Instruments*, **81**(2010), 035107.
- [3] Liu H, Wu Y, Ren Z B, Wu S T, Shi Y J, Peng J, Chen J L, Long F, Yu M, Li Q. *Review of Scientific Instruments*, **81**(2010),044701.
- [4] 刘华军,武玉,施毅,彭晋卿,陈敬林,任志斌.低温工程. **03**(2010),11.
- [5] Arpaia P, Bottura L, Montenero G, Naour S L. *Review of Scientific Instruments*, **83**(2012),095111.
- [6] Arpaia P, Ballarino A, Daponte V, Montenero G, Svelto C. *Review of Scientific Instruments*, **85**(2014), 125111.
- [7] 施毅.中国科学院博士论文.2010.
- [8] Fan X, Meng F, Fu C, Luo Z, Wu S. *ieee international symposium on knowledge acquisition and modeling workshop*. (2009),277.
- [9] 刘金琨. RBF 神经网络自适应控制 MATLAB 仿真. (2014),15.
- [10] 冯旭刚,吴章章.安徽工业大学学报(自科版). **03**(2014),302.