

利用剩余风电的感应储能供暖控制系统研究

田 海,杨曼柔,霍禹同

(内蒙古科技大学信息工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:为了解决我国北方地区风电的弃风问题,改进剩余风电供暖系统的直接消纳储能技术,改善电蓄热供暖控制系统中存在换能装置电热转化效率低下的问题,经过方案对比提出采用电热转换效率高、安全可靠性好电磁感应加热装置作为供暖系统的换能装置。为优化储能水箱加热供暖系统的控制策略,针对系统给定的控制需求,采取前级附加给定温度模糊控制器串联后级感应加热模糊 PID 控制器的复合控制策略,使闭环加热系统的给定温度随室外温度的变化而调整;同时为了节约不可再生能源,降低损耗,采用与后级模糊 PID 控制器的输出构成闭环比值随动控制系统的加热循环流量协调控制策略。利用 Matlab/Simulink 软件进行仿真实验,结果表明:模糊 PID 控制特性明显优于传统 PID 控制,系统的超调量显著减少,动态调节速度明显加快;实现模糊控制和模糊 PID 控制复合与协调智能控制策略的网络化,提高了系统控制的实时性和可靠性,使系统控制性能大为提升。

关 键 词:供暖控制系统;电磁感应加热;模糊 PID;智能控制;复合与协调控制策略

中图分类号:TK02 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.07.020

[引用本文格式]田 海,杨曼柔,霍禹同. 利用剩余风电的感应储能供暖控制系统研究[J]. 热能动力工程,2022,37(7):155-163. TIAN Hai, YANG Man-rou, HUO Yu-tong. Research on induction energy storage heating control system using surplus wind power[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 155-163.

Research on Induction Energy Storage Heating Control System using Surplus Wind Power

TIAN Hai, YANG Man-rou, HUO Yu-tong

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou,
China, Post Code: 014010)

Abstract: In order to solve the problem of wind abandonment for wind power in northern China, improve the energy storage technology of wind power directly absorbed by surplus wind power for heating system and resolve the problem of low electric heating conversion efficiency of energy conversion device exists in the electric regenerative heating control system, through comparison of schemes, the electromagnetic induction heating device with high electric heating conversion efficiency and good safety and reliability is adopted as the energy conversion device of the heating system. In order to optimize the control strategy of the heating system of the energy storage tank, according to the given control requirements of the system, a compound control strategy of the fuzzy controller of the former stage attached with the given temperature and the fuzzy PID controller of the latter stage induction heating in series is adopted, so that the given temperature of the closed-loop heating system can be adjusted with the change of the outdoor temperature. At the same time, in order to save non-renewable energy and reduce consumption, the heating circulation flow coordination control strategy for the closed-loop ratio servo control system with the output of the latter

收稿日期:2021-06-28; 修订日期:2021-11-08

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金资助(2017MS0603)

Fund-supported Project: Supported by Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region(2017MS0603)

作者简介:田 海(1968-),男,北京人,内蒙古科技大学副教授。

通讯作者:杨曼柔(1998-),女,辽宁抚顺人,内蒙古科技大学硕士研究生。

stage fuzzy PID controller is adopted. Matlab/Simulink software is used to simulate the experiment. The results show that the fuzzy PID control is obviously better than the traditional PID control, the overshoot of the system is significantly reduced, the speed of dynamic regulation is obviously accelerated; the realization of the grid of compound and coordinated intelligent control strategy for fuzzy control and fuzzy PID control enhances the real-time and reliability of the system control and greatly improves the performance of the system control.

Key words: heating control system, electromagnetic induction heating, fuzzy PID, intelligent control, compound and coordinated control strategy

引 言

目前,我国北方的广大地区的供暖方式仍然大量采用燃煤锅炉,燃煤供暖产生大量有害气体,对环境造成了极大污染,加剧了雾霾天气,严重影响了人民生命健康^[1]。面对煤炭等不可再生资源越来越匮乏的问题,使用清洁能源成为当务之急,需要加快清洁供暖设备与技术的制定^[2-5]。如何高效利用清洁能源替代燃煤供暖是待解决的问题,具有较高的经济社会需求和工程应用前景。

由于风能具有随机性、间断性、不确定性以及不可控性等特点,如何对其进行高效利用,成为目前的热点问题。我国的风力资源主要集中在东北、西北和华北地区,尤其内蒙古自治区的风力资源极为丰富,占全国各省份中的首位。但是我国电力需求高的地区主要集中在南方,远距离跨网输电的能力严重不足,剩余风电无法全部就地消纳。我国风电领域研究发展规模逐步壮大,对该领域的核心科学问题仍研究不足,关键技术研发相对滞后,弃风问题日益严重,实施“削峰填谷”的用电措施迫在眉睫^[6]。

将多余的风电电能通过换能装置转换成高温水的能量存储起来,用于单位、家庭的冬季采暖具有很多优点,不但可以缓解因燃煤供热造成的环境污染问题,还可以缓解电网的供应侧和需求侧的功率不平衡问题。本文所提出的换能系统采用电磁感应加热储能装置,绿色无污染,较电阻式加热等其它加热方式的电热转化效率高、低碳环保性好、系统安全可靠。鉴于冬季采暖系统供热连续性要求的特点,在风力发电不符合转换条件的时间段,充分利用阶梯电价,按照经济性最优的控制策略^[7],直接采

用清洁电网电能进行储能转换。风电与市电互补的方案用于冬季采暖的储能消纳装置在实际应用中成为可能,有较好的适应性。

1 系统工艺及控制需求分析

1.1 系统控制工艺

电网调度系统结合风电场的风电预测功率、电网用电负荷及供暖系统热负荷需求。在电网电负荷低谷时段,将多余的风电转化为热水的热能储存起来。在电网电负荷高峰阶段,风电有着充足的上网空间,优先满足电网其他电负荷用电,此阶段采用水箱中存储的热水供暖;当电网调度系统的一个调度周期仅用风电不能满足供暖需求时,切换到市电,充分利用阶梯电价直接采用电网电能进行储能转换。

本文所设计的储能式电磁感应加热供暖系统控制工艺流程如图 1 所示。除市电与风电系统外的直接消纳储能及供暖装置包含 3 个子系统:储能水箱加热系统、供暖系统和恒液位补水系统。储能水箱加热系统的核心是水的加热控制,通过综合分析与研究,换能装置采用电热转换效率高、清洁环保的电磁感应加热装置。电磁感应加热控制系统通过闭环调功输出,实现对不同时段水箱热水给定温度的动态跟踪。为了使电磁感应加热装置产生的热能及时的传递到水箱,需要对加热循环流量进行控制,通过变频器控制一备一用的加热循环泵,将产生的热水及时循环到水箱。加热循环流量控制是电磁感应加热闭环控制系统的随动控制系统,是一个随着电磁感应加热输出功率同比例变化的闭环流量控制系统。

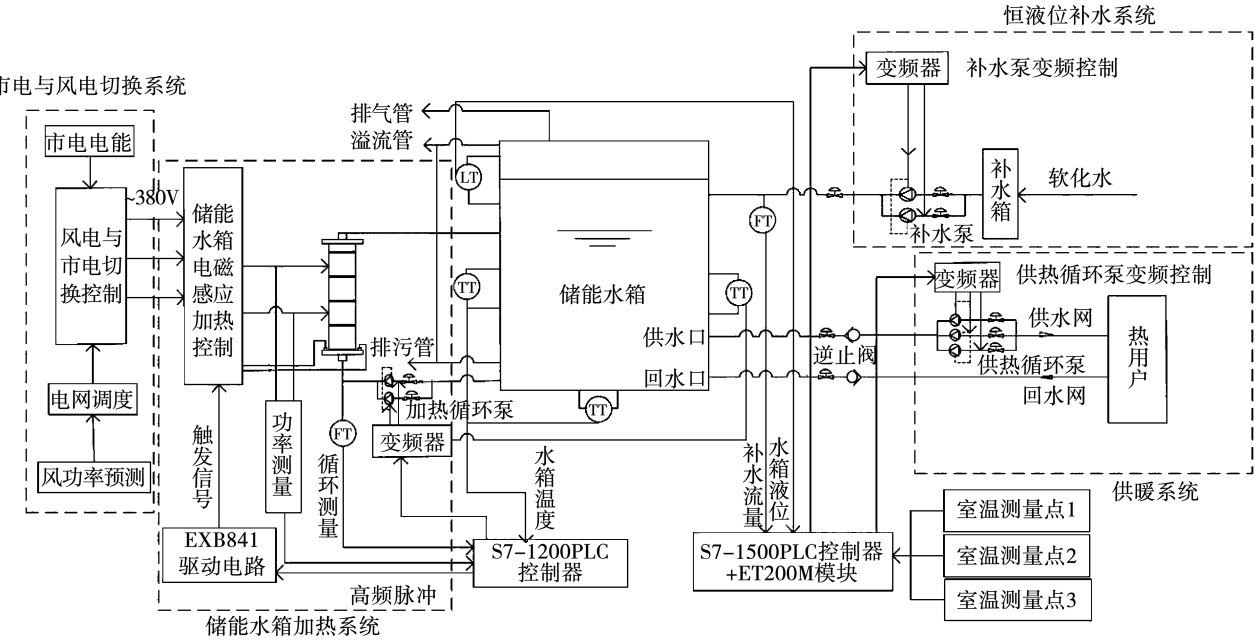


图 1 储能式电磁感应加热供暖系统控制工艺流程

Fig. 1 Control process flow of energy storage electromagnetic induction heating system

供暖系统通过变频器控制 3 台供暖循环泵,将水箱储能的热 水输送到用户,为了提高控制性能和用户舒适度,采用智能的温度闭环控制策略。供暖系统中水的损失是不可避免的,恒液位补水系统采用串级控制方法保持水箱液位的恒定,采用变频器控制一备一用的补水泵,将软化水及时补充到系统中。

1.2 电磁感应加热

从 20 世纪初开始,电磁感应加热凭借加热速度快、效率高等优点开始应用于工业生产过程^[8]。目前,国内外电磁感应加热装置在工业生产中的工件加热、金属熔炼和热处理方面应用较多,民用领域主要应用于加热功率较小的电磁炉,大功率的应用还在起步阶段。

目前,我国北方地区供暖系统的加热源主要有燃煤式、燃油式、燃气式和电热式,电热式加热又分为电阻式和电磁感应式。燃煤式、燃油式和燃气式对能源的需求较高,而且容易对环境造成严重污染。电热式加热采用清洁能源,环保无污染。电阻式加热采用内置电热棒发热,电磁感应式是基于电磁感应原理,通过装置产生的高频感应涡流加热^[9]。电磁感应式较电阻式电热转换效率高,热转换效率达到 95% 以上,采用电磁感应非接触式加热,可避免

电阻式加热方式因漏电等情况造成的安全事故,并且输出采用绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 电子器件,具有无触点、噪声小的特点^[10]。电磁感应式供暖系统具有广阔的应用前景。燃煤、燃气/燃油、电阻式和电磁感应式 4 种加热方式的热效率如表 1 所示^[10]。

表 1 供暖系统加热源热效率对比表
Tab. 1 Comparison table of heating source thermal efficiency in heating system

加热方式	热效率/%
燃煤	60 ~ 75
燃气/燃油	85 左右
电阻式	80 ~ 90
电磁感应式	95 以上

1.3 调功方式

为动态跟踪水箱温度的给定值,电磁感应加热装置的输出功率需要连续可调,形成闭环控制回路。电磁感应加热的调功方式可分为直流侧调功和逆变侧调功。

直流侧调功包含相控整流和直流斩波调压两种调功方式。相控整流调功为,整流电路采用三相全控整流桥,通过移相控制晶闸管的导通角来调节直

给定加热温度 85 ℃,储能水箱进行高效储能蓄热,其他时间段系统进行低设定温度的储能加热模式,主给定加热温度 75 ℃。

用户供暖系统对储能水箱热能的消散速度与外界温度及外界温度的变化有直接的关系。由于水箱水温控制是一个大滞后系统,因此根据外界气温的变化,必须及时对不同时段的主给定加热温度进行修正。本文设计一个以外界温度及外界温度变化为二维输入的模糊控制器,其输出作为主给定加热温度的附加给定。

储能水箱加热温度控制系统是由两级模糊控制器复合串联构成的。将模糊控制器作为前级控制器,其输出作为储能水箱加热给定温度的附加给定,加上不同时段的主给定温度值,作为系统总给定温度,后级模糊 PID 控制器的输出用于电磁感应加热功率的闭环调节。

当系统切换到风电储能模式时,电磁感应加热温度控制器的温度给定直接按照高设定主给定温度 85℃ 加附加补偿给定温度(前级控制器的输出)的模式运行。加热循环流量系统与储能水箱加热温度控制系统存在强耦合关系,需要两者之间协调控制。电磁感应加热的输出功率增加代表转换热量增加,需要加大循环流量,及时的将热量传递到水箱。加热循环流量系统的流量与电磁感应加热装置的输出功率同步变化,才是最佳的节能运行方式。为此,在后级模糊 PID 控制器中增加一个从动的闭环控制系统,加热循环流量协调控制策略采用与后级模糊 PID 控制器构成闭环的随动控制系统。主动环是后级模糊 PID 控制器,随动环是加热循环流量 PID 控制器,主动环中的功率输出(归一化)作为随动环加热循环流量 PID 控制器的输入,循环流量测量值(归一化)作为其反馈信号。

2.2 供暖系统的温度模糊 PID 控制策略

研究以往用户供暖系统的控制方法发现,以温度 PID 控制为主,控制系统的动态响应慢;采用出水温度和回水温度的恒温差 PID 控制方法,但用户温度不能恒定在需要的理想温度。借鉴以往设计的不足,本设计在满足供暖舒适度和节能降耗的前提下,对用户供暖系统采用室温温度模糊 PID 闭环控制策

略。用户供暖系统控制框图如图 3 所示。

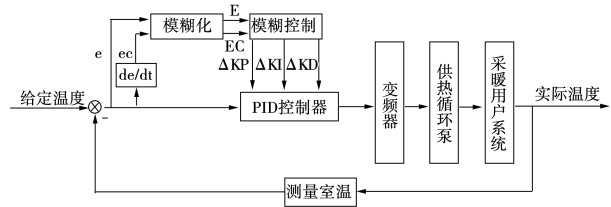


图 3 用户供暖系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of user heating system

为了在非供暖期提高设备利用率和投入产出比,避免设备闲置,可以把系统切换到宾馆或家庭的洗浴热水系统中。系统中除了使用储能热水的负荷发生变化之外,其他部分的设计及控制策略保持不变。相应热负荷变化涉及图 3 中的改变,给定温度设置为洗浴温度 60 ℃ 左右,变频器选择洗浴热水循环泵,热负荷为洗浴热水系统,反馈所采集的数据是用户末端管网中实际的热热水温度。

2.3 储能水箱恒液位串级控制策略

由于单闭环的 PID 储能水箱恒液位补水控制效果不佳^[12],因此对储能水箱恒液位补水系统采用串级控制进行设计,采用液位作为主调节回路、流量作为副调节回路的串级 PID 控制方法。液位控制作为主调节回路,负责“细调”,流量控制作为随动控制副回路,负责“粗调”。采用串级控制,可以快速抑制进入副调节回路的二次扰动,提高了系统的动态性能和稳定性。储能水箱恒液位补水系统串级 PID 控制框图如图 4 所示。

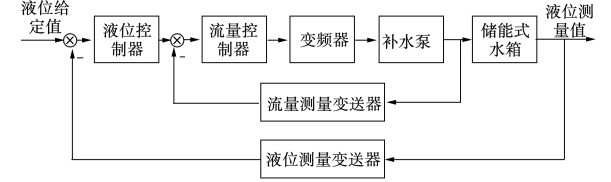


图 4 储能水箱恒液位补水系统串级 PID 控制框图

Fig. 4 Cascade PID control block diagram of constant level complement water system of energy storage tank

3 基于控制网络的智能控制系统的设计

以往的电加热供暖控制系统中硬件和软件平台普遍较为陈旧,控制方法较为简单。许多系统采用继电控制系统,使用器件多、控制线路复杂,现场设

备信号传输还是采用 4 ~ 20 mA 或 0 ~ 10 V 的电气信号,控制的实时性和可靠性低,故障率居高不下,系统维护成本逐年增加。控制方式仍然以经典控制理论为基础,有些装置还是采用开环的控制方式,闭环控制方式以简单的 PID 为主,控制效果不理想;对运行参数,如介质温度、介质压力等分别构成单回路的调节系统,控制器大多采用模拟式调节器、机械式

调节器和比例调节器。这种控制系统虽然具有简单的参数调节功能,满足实现基础的工艺控制要求,但难以保证系统安全可靠运行,无法满足精确控制和智能化控制的需求,更达不到系统总体效率最佳的运行要求。本设计中复合及协调的智能控制策略等都是基于控制网络实现的。储能式电磁感应供暖系统控制网络结构图如图 5 所示。

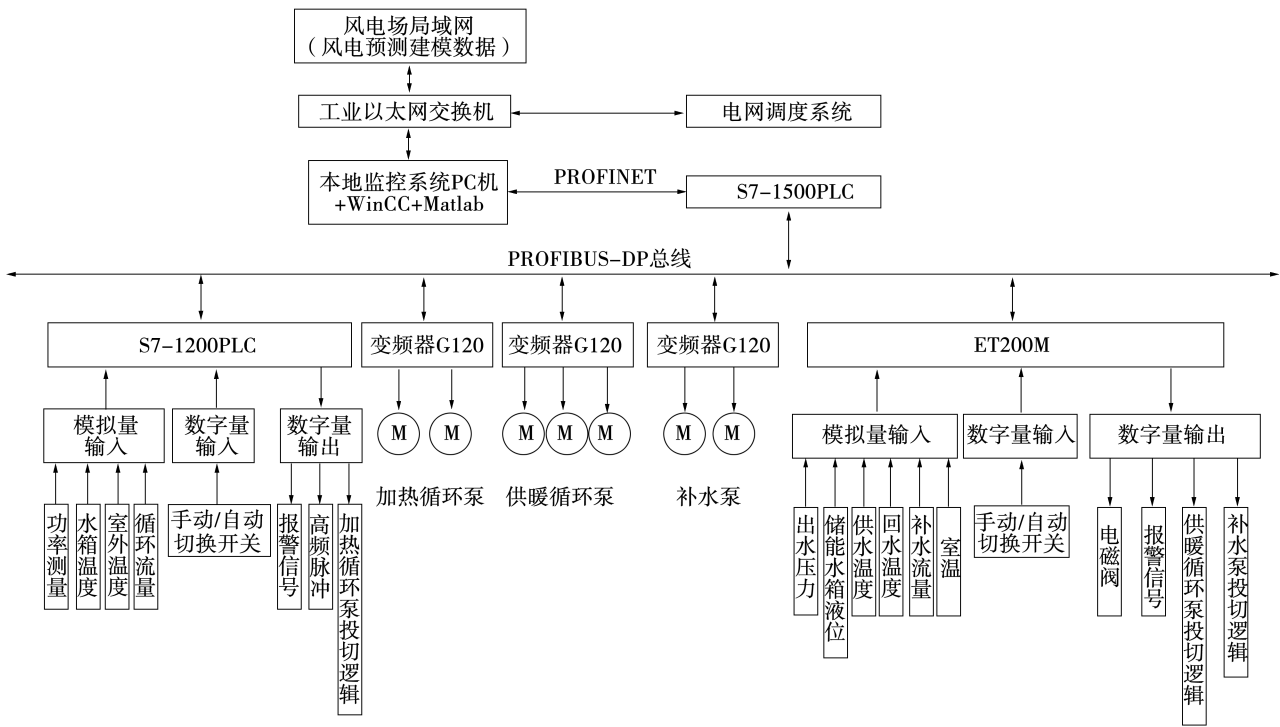


图 5 储能式电磁感应供暖系统控制网络结构图

Fig. 5 Control network structure of energy storage electromagnetic induction heating system

3.1 控制网络系统的设计

3.1.1 主站系统

主站与从站的通讯主要采用 Profibus-DP 总线方式,使用 PN(Profinet)方式与上位机通讯,实现运行参数同步交互。主站控制器选用西门子 1500 系列 1511 - PN,以其机架上配置的 DP 主站模块作为 Profibus-DP 现场总线的主站。在上位机系统中安装西门子 Portal V15 软件、Matlab 软件等,并在 Portal 软件中装载变频器从站接入 Profibus-DP 总线所需 GSD 文件。主站的主要作用是实现实时监控、数据备存、参数设定和故障判断报警等功能。

3.1.2 从站系统

监控系统从站共分为三类:S7 - 1200 系列控制器、通讯模块以及数字量/模拟量扩展模块构成的智能从站,以此从站进行复合串联型模糊控制器的运

算,输出高频脉冲,作用于电磁感应加热系统;带有 Profibus-DP 通讯接口的西门子 G 系列变频器,以 G120 变频器驱动系统各泵组;ET200M 分布式 I/O 从站,仪表参数反馈、通讯设备控制等信号皆以此与主站系统数据交互,并解决无 DP 通讯接口设备无法并入系统网络架构的问题^[13-14]。

3.2 智能控制策略的系统实现

为解决 CPU 计算能力不足的问题,减轻 CPU 用于智能控制算法的编程量,提高系统控制的实时性。在模糊控制器和模糊 PID 控制器串联联立及实现的过程中,使用上位机中 Matlab 软件构造各种控制器,事先将输出结果录入上位组态数据块中。模糊控制器和模糊 PID 控制器复合控制时根据各控制器实时输入数据直接实时获取各控制器输出结果^[15]。

供暖系统采用的模糊 PID 控制器在 Matlab 软件构造和可编程逻辑控制器(PLC)中实现供暖的具体过程:根据构建供暖系统模糊 PID 控制器所需的输入参数物理论域、模糊规则等,在 Matlab 软件中的模糊逻辑工具箱(Fuzzy Logic Toolbox)中进行线下构造模糊 PID 控制器,并将其模糊推理输出的结果以查询表的方式存放到 S7-1500CPU 组态的数据块 DB 内。实际运行时,控制器根据系统实时输入的温度偏差 e 和温度偏差的变化率 ec ,通过查表程序直接读取 PID 所需的 ΔKP , ΔKI 和 ΔKD 的补偿值。实时矫正后 kp , ki 和 kd 参数直接动态赋值给 PID 控制器,PID 控制器采用 Portal V15 软件内专用 PID 模块,PID 控制器的输出值用于控制供暖循环泵投入功率的大小。

对于储能水箱加热系统的串联复合模糊控制器的构造与实现过程与上述方法类似。在 Matlab 软件中线下分别构造前级模糊控制器和后级模糊 PID 控制器,并获取各自的推理输出结果,将其转换为查询表事先存于 S7-1200CPU 的共享数据块中。根据前、后级控制器的实时输入值,直接通过查表程序读取储能水箱加热系统前、后两级模糊控制器的输出值。

3.3 基于 Matlab 的模糊 PID 控制系统仿真

3.3.1 模糊 PID 控制器的构造

模糊 PID 控制器由模糊控制器和 PID 控制器组

合而成。依据水箱温度偏差 e 和水箱温度偏差变化率 ec 动态调节 PID 的比例、积分、微分 3 个系数的 kp , ki 和 kd 。在 Matlab 软件模糊控制工具箱中进行模糊控制器的设计,构造过程可分为以下 4 个步骤:

(1) 输入输出量的选取以及模糊化:选取偏差 e 和偏差变化率 ec 为模糊输入量,PID 3 个系数的修正量 ΔKP , ΔKI , ΔKD 为模糊输出量。偏差 e 的论域为 $[-10,10]$;偏差变化率 ec 的论域为 $[-8,8]$;模糊论域为 $[-6,6]$ 。

(2) 输入输出量隶属度函数的确定:各输入输出模糊量的模糊论域均设置为离散整数论域 $[-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6]$ 。用 7 个语言变量[NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB]表示,分别代表着{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大}7 个语言值。常用的隶属度函数有三角形、正态形、升半梯形、矩形等 9 种,本设计的输入语言变量的隶属度函数选用高斯型,输出语言变量的隶属度函数选用三角形。

(3) 模糊规则的确立:运算规则是模糊控制的关键内容,可以很好地反映出控制成效。由经验可以得出 ΔKP , ΔKI , ΔKD 的模糊控制表如表 2 所示。

(4) 解模糊:本设计采用重心法解模糊,对模糊输出量及其相对的隶属度函数求加权平均值作为模糊控制器的实际输出作用于 PID 控制器。

表 2 ΔKP , ΔKI , ΔKD 的模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rules of ΔKP , ΔKI , ΔKD

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

3.3.2 仿真实验及结果

储能水箱加热系统是一阶惯性加纯滞后环节,根据系统阶跃响应确定对象传递函数参数,传递函数为:

$$G(S) = \frac{1}{20.9S + 1}e^{-7.64s}$$

(1)

式中: S —储能水箱加热系统中的变量。

PID 的初始参数采用著名学者 Ziegler 和 Nichols 的临界比例度法进行校正^[10,16],得出: $kp = 0.75$, $ki = 0.05$, $kd = 3$ 。在 Matlab 软件环境中验证传统 PID 和模糊参数自整定 PID 控制器的控制效果。

Matlab 软件中仿真程序框图如图 6 所示,图中 $\frac{1}{S}$ 和 $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ 为PID控制器或者模糊 PID 控制器的积分和微分

环节。后级模糊 PID 与传统 PID 的对比仿真结果如图 7 所示。

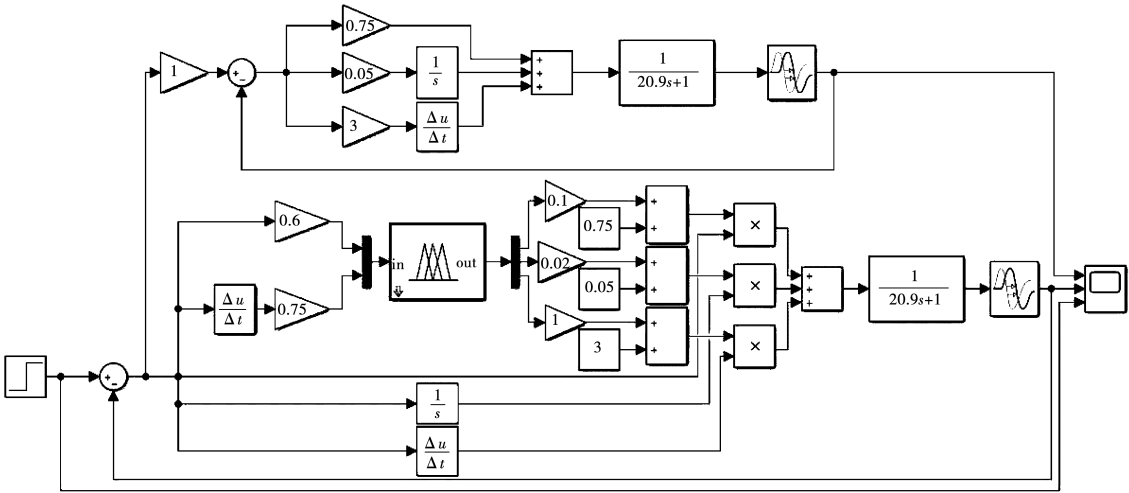


图 6 Matlab 中仿真程序框图

Fig.6 Block diagram of simulation program in Matlab

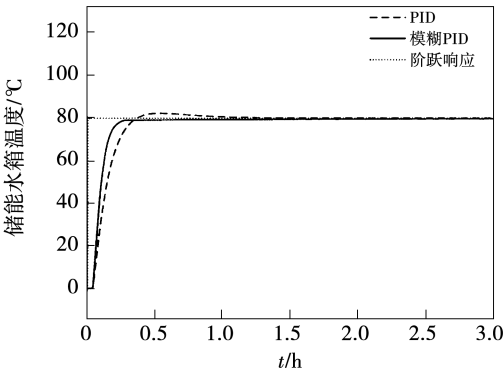


图 7 后级模糊 PID 与传统 PID 的对比仿真结果

Fig.7 Simulation results of the comparison between the latter stage fuzzy PID and the traditional PID

在系统稳定后,加入 1 个干扰,加干扰的后级模糊 PID 与传统 PID 的对比仿真结果如图 8 所示。PID 控制下的温度响应曲线波动较大,很长时间后系统才能恢复稳态。模糊 PID 控制下的温度响应曲线的波动很小,并且在很短的时间内系统就可以恢复稳态。仿真实验结果证明,相对比传统的 PID 控制器,模糊参数自整定 PID 控制器的超调量显著减少,动态调节速度明显加快。

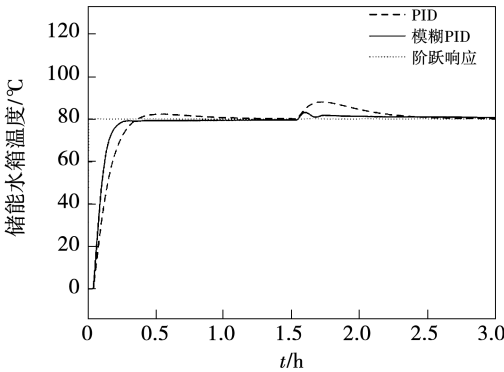


图 8 加干扰的后级模糊 PID 与传统 PID 的对比仿真结果

Fig.8 Simulation results of the comparison between the latter stage fuzzy PID with disturbance and the traditional PID

4 结 论

- (1) 采用直接消纳风电储能技术将剩余风电用于大功率的供暖系统,与市电形成互补,探索可再生能源有效利用的新途径,提高风电的利用率。
- (2) 系统研发利用阶梯电价将电热转换效率高、清洁环保的电磁感应加热装置作为大功率储能式供暖系统的换能装置。
- (3) 针对各子系统的控制需求,选择不同的控

制策略,其中包括模糊控制和模糊 PID 控制及控制环节之间的复合及协调控制,加之基于经典传统控制理论的串级控制,多种控制手段的实施,使系统的整体的自动化和智能化达到一个较高的水平。

(4) 对系统的硬件和软件环境进行升级,智能控制的网络化实现,提高了储能式电磁感应供暖系统控制的实时性和可靠性。

参考文献:

- [1] 陈 强,孙丰凯,徐艳嫔. 冬季供暖导致雾霾来自华北城市面板的证据[J]. 南开经济研究,2017(4):25-40.
CHEN Qiang, SUN Feng-kai, XU Yan-xian. Does winter heating cause smog? Evidence from a city panel in north China[J]. Nan-kai Economic Studies,2017(4):25-40.
- [2] 刘亚非,张 有,焦铭泽,等. 北方农村地区供暖现状与对策[J]. 煤气与热力,2019,39(1):29-32.
LIU Ya-fei, ZHANG You, JIAO Ming-ze, et al. Current status and countermeasures of heating in rural areas of northern China[J]. Gas & Heat,2019,39(1):29-32.
- [3] 吴 亮,吴 迪,解 岩,等. 京津冀农村“煤改电”运行情况分
析[J]. 电力需求侧管理,2018,20(4):36-41.
WU Liang, WU Di, XIE Yan, et al. Performance analysis of rural "coal to electricity" in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Power Demand Side Management,2018,20(4):36-41.
- [4] 谢伦裕,常亦欣,蓝 艳. 北京清洁取暖政策实施效果及成本
收益量化分析[J]. 中国环境管理,2019,11(3):87-93.
XIE Lun-yu, CHANG Yi-xin, LAN Yan. The effectiveness and cost-benefit analysis of clean heating program in Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Management,2019,11(3):87-93.
- [5] 朱 婧,潘方圆,周辛南,等. 清洁采暖技术与进一步降低用电
成本的研究——基于蓄热式电采暖负荷参与电力市场中长期
交易模式的探索[J]. 价格理论与实践,2020(3):91-94.
ZHU Jing, PAN Fang-yuan, ZHOU Xin-nan, et al. Research on
clean heating technology and further reduction of electricity cost—
exploration of trading mode for thermal storage electric heating load
in medium and long-term electricity market[J]. Price Theory and
Practice,2020(3):91-94.
- [6] 陆斯悦,及洪泉,徐 蕙,等. 基于需求侧调峰的农村电采暖设
备负荷优化控制策略[J]. 农业工程学报,2020,36(9):
229-234.
LU Si-yue, JI Hong-quan, XU Hui, et al. Optimal load control strat-
egy of rural electric heating equipments based on demand side peak
load regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricul-
tural Engineering,2020,36(9):229-234.
- [7] 祁 兵,何承瑜,李 彬,等. 基于蓄热电锅炉不同工作模式的
区域综合能源系统优化调度[J]. 现代电力,2019,36(6):
45-51.
QI Bing, HE Cheng-yu, LI Bin, et al. Optimal scheduling of region-

- al integrated energy system based on different working modes of e-
lectric boiler with thermal storage [J]. Modern Electric Power,
2019,36(6):45-51.
- [8] 胡焄豪. 电磁感应器加热技术的应用与研究[J]. 科技创新导
报,2016,13(28):50-51.
HU Jun-hao. Application and research of electromagnetic induction
heating technology [J]. Science and Technology Innovation Her-
ald,2016,13(28):50-51.
- [9] 吴一帆. 电磁采暖系统设计与控制策略研究[D]. 成都: 电子
科技大学,2020.
WU Yi-fan. Research and design of electromagnetic heating system
and control strategy [D]. Chengdu: University of Electronic Science
and Technology,2020.
- [10] 张绍阁. 储热式感应加热采暖装置监控系统的设计[D]. 包
头: 内蒙古科技大学,2019.
ZHANG Shao-ge. Design of monitoring and controlling system of
induction heating device of heat storage type [D]. Baotou: Inner
Mongolia University of Science and Technology,2019.
- [11] 鞠佃军. 多谐振器串联谐振式感应加热电源研究[D]. 杭州:
浙江大学,2020.
JU Dian-jun. Research on multi-resonator series resonant induction
heating power supply [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2020.
- [12] 常建东,虎恩典,赵文贤,等. 基于 PID 参数自整定的液位控
制系统设计及其实现[J]. 现代电子技术,2016,39(5):152-
154,160.
CHANG Jian-dong, HU En-dian, ZHAO Wen-xian, et al. Design
and implementation of liquid-lever control system based on PID
parameters self-tuning [J]. Modern Electronics Technique,2016,
39(5):152-154,160.
- [13] 马林联,马铭泽. 基于 PLC 和组态软件的沸腾锅炉监控系统
设计[J]. 电气传动,2021,51(2):58-61.
MA Lin-lian, MA Ming-ze. Design of boiling boiler monitoring
system based on PLC and configuration software [J]. Electric
Drive,2021,51(2):58-61.
- [14] 齐晓军,田 海. 串级模糊控制器在换热站监控系统中的设
计[J]. 电气传动,2015,45(1):58-63.
QI Xiao-jun, TIAN Hai. Design of cascade fuzzy controller in a
heat exchange station monitoring system [J]. Electric Drive,
2015,45(1):58-63.
- [15] 宋 璐,卫亚博,冯艳平. 基于模糊 PID 的温度控制系统的设计
与仿真[J]. 电子设计工程,2020,28(21):51-55.
SONG Lu, WEI Ya-bo, FENG Yan-ping. Design and simulation of
temperature control system based on fuzzy PID [J]. Electronic De-
sign Engineering,2020,28(21):51-55.
- [16] 李盛伟,张 来,梁海深. 基于串级 PID 的相变储能电锅炉温
度控制技术[J]. 热能动力工程,2020,35(8):85-89.
LI Sheng-wei, ZHANG Lai, LIANG Hai-shen. Temperature control
technology of phase change energy storage electric boiler based on
cascade PID [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and
Power,2020,35(8):85-89.