

同步调相机高速段转子位置估算算法研究

吴凯¹,高桂革¹,咸哲龙²,章辰翔²

(1.上海电机学院 电气学院,上海 201306;

2.上海电气电站集团发电机厂,上海 201306)

摘要:大型同步调相机在运行过程中,需要对转子位置进行快速高精度的检测。位置检测的精度、速度直接影响同步调相机运行的稳定性、效率等各项参数。针对传统锁相环磁链法在调相机高速段受低频谐波干扰大的问题,引入了二阶广义积分滤波器和模糊控制对传统锁相环进行了改进,有效提高了位置检测对谐波的滤除能力和检测速度、精度。对于从低速位置传统锁相环检测模块切换到高速改进锁相环位置检测模块时误差较大的问题,设计柔性切换位置估算模块。最后,在Matlab软件中搭建相应的位置估算系统,通过对比仿真验证了所设计的位置估算方法的正确性。

关键词:同步调相机;转子位置估算;锁相环;模糊PID

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19234

Research on Rotor Position Estimation Algorithm of Synchronous Compensator at High Speed

WU Kai¹,GAO Guige¹,XIAN Zhelong²,ZHANG Chengxiang²

(1. Electrical College, Shanghai Dian Ji University, Shanghai, 201306;

2. Shanghai electric power station group generator plant, Shanghai, 201306)

Abstract: During the operation of large synchronous compensator, it is necessary to detect the rotor position quickly and accurately. The accuracy and speed of position detection directly affect the stability, efficiency and other parameters of synchronous compensator. The two order generalized integral filter and fuzzy control were introduced to improve the traditional phase locked loop (PLL). It effectively improved the ability of location detection to remove harmonics and the speed and accuracy of detection. A flexible switch location detection module was designed, the problem of large error in switching from low-speed position detection module to high-speed, improved PLL position detection module was deduced. Finally, the corresponding position detection system was built in the Matlab software, and the correctness of the location detection method was verified by comparative simulation.

Key words: synchronous compensator; rotor position detection; phase-locked loop; fuzzy PID

在电力系统中,同步发电机是最常见的旋转设备,它在发出有功功率的同时,还可以发出无功功率,而且是性能最优越的无功电源。调相机是一种特殊运行状态下的同步发电机,当应用在电力系统时,能根据系统的需要,自动地在电网电压下降时增加无功输出;在电网电压上升时吸收无功功率,以维持电压,提高电力系统的稳定性,改善系统供电质量^[1]。

调相机性能优势主要体现如下:

1)具备过载能力且无功输出受系统电压影响小。在强励作用下可短时间内发出超过2倍额

定容量的无功功率,并且对于持续时间较长的故障可提供较强的无功支撑;

2)具备次暂态特性。能够在故障发生瞬间发出(吸收)大量瞬时无功,支撑电网电压,抑制直流换相失败、工频过电压等;

3)具备深度进相能力。调相机最大进相能力约为额定容量的2/3;

4)运行稳定性好。调相机基于传统的同步电机技术,设备和控制技术成熟,抗干扰能力强;

5)使用寿命长,占地面积小。调相机使用寿命约30 a,占地面积约为同容量SVC的1/3^[2];

调相机机组在启动过程中,若转子初始位置检测不准,会导致机组启动失败或使机组反转,进而造成盘车机构的齿轮损坏的问题。转子位置通过电压磁链获得,在算法上是通过电压的积分得到的。但在低速阶段由于谐波的存在以及采样通道的误差,会给计算带来较大误差,因此对于积分算法若不对采样信号进行一定处理很容易导致积分趋近饱和,影响转子位置计算^[3]。同步电机低速阶段准确获取转子位置信号的方法主要包括高频信号注入法^[4-5]和自适应磁链法^[6]。高频信号注入法通过在同步电机转子额外加入高频电流信号,利用电机的定子电压响应获取转子位置信息,虽然该方法能够准确获取零速和低速运行时同步电机的转子位置,但是该方法不适用于大型同步电动机;自适应磁链法虽然能够在低速时对同步电机的转子位置进行准确的计算,但是该算法复杂,参数很难确定,在实际运行中系统的鲁棒性不强,极易失稳。

为了提高调相机机组转子位置检测的精度,减少机组启动失败的可能性,本文研究了高速位置检测模型的模糊校正PID控制器模型,并将其应用到改进锁相环位置检测模型里,并提出一种解决位置检测模块刚启动时误差较大问题的控制策略。

1 高速段转子位置估算

当调相机转速升高到一定程度,电机定子端电压逐渐稳定,且幅值较大,容易通过锁相环计算对其端电压进行分析^[7],通过PI调节器获得调相机转速和位置信号。

1.1 基于传统锁相环法位置估算

传统锁相环位置估算系统如图1所示。该系统将直轴反电势 e_d 作为反馈量,通过PI控制器将其控制为0,PI控制器输出为转速 ω ,经过一个积分器获得转子当前位置 θ ^[8]。

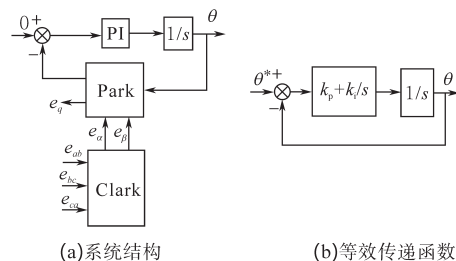


图1 传统锁相环位置检测原理框图

Fig.1 Principle block diagram of traditional phase-locked loop position detection

该系统结构简单稳定,反应速度快。图2为传统锁相环的Matlab实现模型。但是对于调相机启动控制系统而言,系统内部存在很大的谐波分量,尤其是低频谐波的存在难以有效滤除,使定子端电压产生严重畸变,此时锁相环的位置检测结果会有很大的误差。

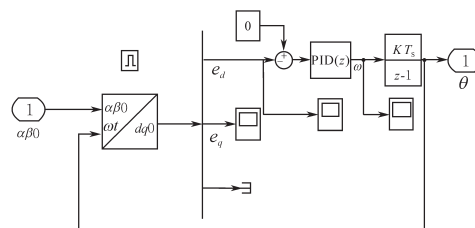


图2 传统锁相环位置检测模型图

Fig.2 Model diagram of traditional phase-locked position detection loop

1.2 基于二阶广义积分滤波器法位置估算

出于上述传统锁相环位置检测的问题,本文引入二阶广义积分滤波器对定子端电压中的谐波分量进行正交分解,提取出谐波中的零序、正序、负序分量,然后通过特定的滤波器对其进行滤除,减小谐波的影响^[9]。二阶广义积分滤波器结构如图3所示,输入信号为误差 e ,输出 e' , qe' ,参数是品质因数 k 和谐振频率 ω_n 。

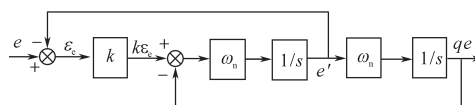


图3 二阶广义积分滤波器结构图

Fig.3 Structure diagram of second-order generalized integral filter

当输入信号频率 $\omega=\omega_n$,二阶广义积分滤波器可以无衰减输出,输出信号 qe' 与 e' 相位差为滞后 $\pi/2$,可以实现正交信号功能。在Matlab中建立二阶广义积分滤波器模型如图4所示。

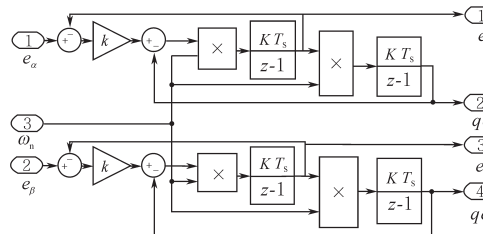


图4 二阶广义积分滤波器模型图

Fig.4 Model diagram of second-order generalized integral filter

依据上述理论,对传统锁相环位置检测模型进行优化,加入二阶广义积分滤波器用以提取反电势中的基波分量,在Matlab中搭建如图5所示

的改进锁相环位置检测模型。

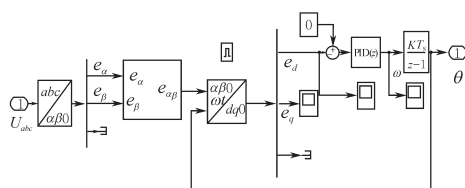


图5 改进锁相环位置检测模型图

Fig.5 Improved position detection of phase-locked loop Model diagram

2 基于模糊控制的位置估算算法

2.1 模糊控制原理

对于非线性时变系统,采用经典PID控制策略难以达到一个良好的控制效果,而模糊控制规则建立在人对一个非线性系统的模糊化认识基础之上,对非线性系统具有更好的适应性,控制效果更好^[10]。模糊控制属于非线性控制策略中的一种。模糊控制算法不要求对系统数学模型有精确的表达式,无需对系统进行系统函数求解,在多种情况下均可以适用,在控制领域具有很广泛的研究。模糊控制的基本原理是:用近似人类的行为语言对系统反应进行描述,构成一系列的模糊函数规则表。将系统输入量进行查表,选择对应的数据库和规则,通过一定的模糊计算给出控制器的输出量。

模糊控制主要由模糊化、模糊规则、知识库和非模糊化规则构成,如图6所示。模糊化通过模拟人对自然变量的认识,将一个具体的值模糊为“很大”、“大”、“小”、“很小”等类似于人类语言描述的变量,主要通过论域、模糊子集、隶属度函数对其进行配置;知识库和模糊规则是基于人类在该系统方面的专家对以往经验的总结,可语言表述为:“if A and B, then C”,主要通过论域处理、输入输出空间划分、隶属度函数进行配置;反模糊化是将模糊规则确定的离散化的量经过特定的反模糊规则,转换成具体的可以被系统直接接受的变量,直接对系统进行控制^[11]。

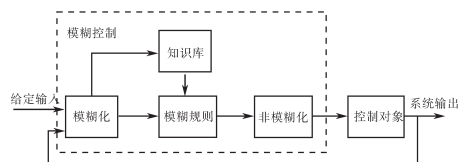


图6 模糊控制框图

Fig.6 The block diagram of fuzzy control

2.2 模糊位置检测原理

在上文所述的改进锁相环位置检测模型中,存在一个PID调节器,用来对偏差信号进行控制,输出转速经过积分获得位置信号。但是在位置检测过程中,刚开始进行位置检测时,误差较大,为了获得一个更好的快速响应,此时的比例系数应该稍大,积分系数应该稍小,微分系数稍大。当位置检测过程进行到一定程度时,位置偏差逐渐减小,此时若不改变PID参数,可能会造成系统存在一定的振荡、超调,进而影响到调相机的稳定运行状态。

因此,考虑通过模糊控制对PID参数进行在线校正,当误差变小时,适当减小比例系数 K_p ,增大积分系数 K_i ,减小微分系数 K_d ^[12]。模糊校正PID的系统框图如图7所示。

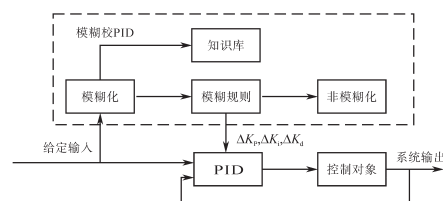


图7 模糊校正PID

Fig.7 Fuzzy correction PID

Matlab中有多种隶属度函数供选择,本文选取高斯函数作为隶属度函数,将偏差 E 和偏差微分 EC 通过各自的增益系数变换为 $[-10, 10]$ 的区间内。图8为隶属度函数图像。偏差和偏差微分都通过该函数进行模糊化,将模拟量变换为“大负(NB)、中负(NM)、小负(NS)、零(ZO)、小正(PS)、中正(PM)、大正(PB)”的模糊集内。然后通过模糊控制规则表进行模糊输出值的计算。

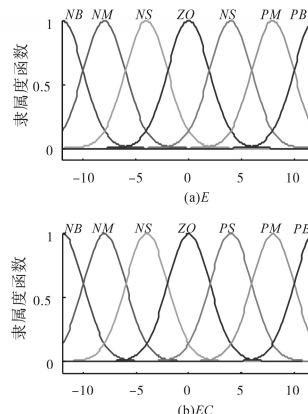


图8 隶属度函数图

Fig.8 Membership function diagram

比例系数 K_p 的大小直接影响到系统的反应速度,依据经验设计如表1所示的比例系数模糊校

正规则表。控制前期,当偏差和偏侧微分都为很大时,适当增大比例系数,以提高系统的反应速度;控制后期,当偏差和偏差微分较小时,适当减小比例系数,以维持系统稳态并防止过大的超调。

表1 K_p 模糊校正规则表

Tab.1 K_p fuzzy correction rule table

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

积分系数 K_i 主要影响到系统稳态误差,依据经验设计如表2所示的积分系数模糊校正规则表。模糊校正的大体趋势是当偏差和偏侧微分都为很大时,为了防止控制器积分饱和和在后期导致系统超调,应适当减小积分系数,一般可以取接近0的值;当偏差和偏差微分较小时,为了减小系统的稳态静差,应适当增大积分系数。

表2 K_i 模糊校正规则表

Tab.2 K_i fuzzy correction rule table

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

微分系数 K_d 的主要起调节和改善系统动态性能的作用。在控制前期,偏差和偏差微分比较大,此时应当增大微分系数,使系统最终的超调量较小。在控制后期,偏差和偏差微分较小,此时应减小微分系数,减弱扰动对系统控制的影响。表3为 K_d 模糊校正规则表

表3 K_d 模糊校正规则表

Tab.3 K_d fuzzy correction rule table

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

依据隶属度函数、模糊校正规则表,获得

Matlab 中的模糊向量,在 Matlab 中搭建如图9所示的模糊PID模块。该模块通过增益系数 GE 和 GEC 将偏差和偏差微分归化到 $[-10, 10]$ 的标准区间内。经过 Matlab 集成的 Fuzzy controller 模块实现对PID参数的在线校正。

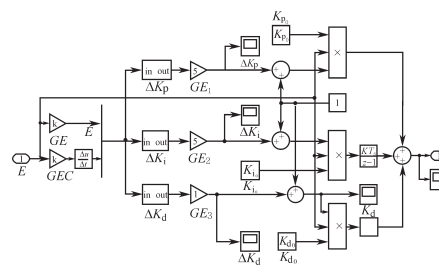


图9 模糊PID模块

Fig.9 Fuzzy PID module

2.3 模糊位置检测建模

用模糊校正PID代替改进锁相环中的普通PID,获得如图10所示的模糊位置检测模块。其模块结构和检测原理同改进锁相环基本一致。

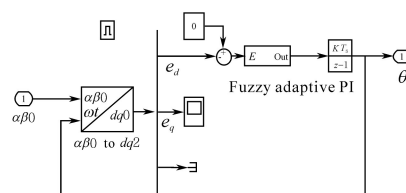


图10 模糊位置检测模块

Fig.10 Fuzzy position detection module

3 位置检测柔性切换

基于上述分析,对于不同的转速阶段设计了不同的位置检测模块,各模块在各自转速区间内具有较好的反应速度和检测精度。但是在实际仿真过程中发现的一个主要问题是:当改进锁相环位置检测模块刚刚启动时,需要一定的时间才能到达稳定,在此过程中位置检测的误差可能会很大,较大的检测误差会对逆变器的控制角产生很大的影响,进而影响电机运行状态,可能会造成电机振荡、失控等危险情况的发生,这种问题在电机较高速运行时尤为严重^[13-14]。

为了解决上述问题,考虑将不同位置检测模型的切换转速附近,通过一定的方式动态完成位置检测模型的切换。实现的方式是通过一个与转速相关的动态比例因子,利用该比例因子计算待切换的2个模型之间位置平均值^[15]。该方法的表达式如下:

$$\omega_{re} = \alpha\omega_{li} + (1 - \alpha)\omega_{hi}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \omega_{re} < \omega_l \\ \frac{1}{\omega_h - \omega_l}(\omega_{re} - \omega_l) & \omega_l < \omega_{re} < \omega_h \\ 0 & \omega_{re} > \omega_h \end{cases}$$

式中: ω_l 为过渡区域最低转速; ω_h 为过渡区域最高转速; ω_{li} 为低转速位置模型输出结果; ω_{hi} 为高速改进锁相环位置模型输出结果; ω_{re} 为柔性切换模型输出结果。

这样,在启动改进锁相环位置检测模型前期,该模块的检测误差较大,但是此时模型的输出位置主要由较低速时的传统锁相环模型输出决定;随着转速升高,高速位置改进锁相环检测模型输出的占比逐渐增大,最终达到100%,实现了位置检测的柔性切换,图11为Matlab中搭建的柔性切换模块。

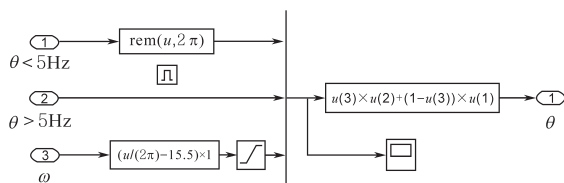


图11 柔性切换模型

Fig.11 Flexible switching model

利用柔性切换模块在Matlab中搭建出如图12所示的模糊位置检测柔性切换模型。为了进行后续仿真数据对比,保留了普通PID改进锁相环位置检测模块和模糊校正PID改进锁相环位置检测模块。各个模块通过一个滞环比较器的输出作为使能端,当转速达到一定值时,滞环比较器置1,启动各个位置检测模块。

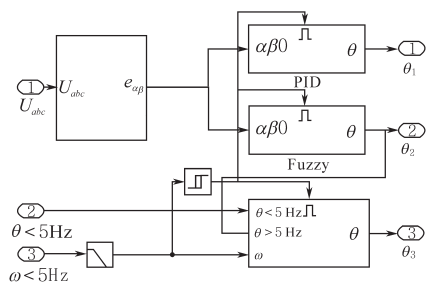


图12 模糊位置检测柔性切换模型

Fig.12 Flexible switching model of fuzzy position detection

4 高速位置仿真验证

4.1 锁相环位置检测仿真

同步调相机在高速阶段,已经可以进行自然换相,反电势中的低次谐波比例也逐渐降低。传

统锁相环的检测结果如图13所示。角度检测启动后,检测角度逐渐跟随上实际角度,在经过大约4个周期0.25 s的时间后,检测角度基本与实际角度一致,误差在0.3 rad以内。

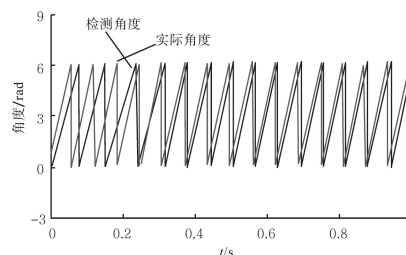


图13 传统锁相环方法

Fig.13 Traditional phase-locked loop method

改进锁相环的检测结果如图14所示。传统锁相环的PID控制器被优化为模糊校正PID,对其收敛速度和精度进行优化。角度检测启动后,检测角度逐渐跟随上实际角度,在经过大约2个周期0.13 s的时间后,检测角度基本与实际角度一致,误差在0.05 rad以内。

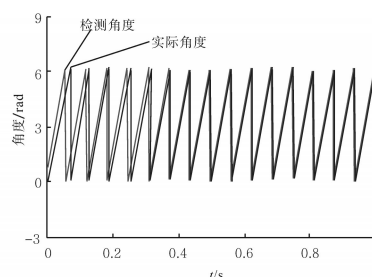


图14 改进锁相环方法

Fig.14 Improved phase locked loop method

比较2种锁相环的仿真结果,改进锁相环位置检测方法的检测精度更高,达到实际角度的速度更快。改进锁相环位置检测采用了二阶广义积分。仿真中,二阶广义积分滤波器的品质因子 k 选值1.414,可达到较高的滤波效果和动态响应综合指标,谐振频率为通过锁相环获得的转速频率。在实际仿真验证时,发现该转速频率含有很高的高频干扰,因此需要经过滤波。锁相环的PI参数经过模糊控制在优化,使改进锁相环位置检测系统的响应速度得到改善。

4.2 柔性切换位置检测

分析上述2种锁相环位置检测仿真结果,发现在检测初期,无论是传统锁相环还是改进锁相环,位置检测的误差都比较大。基于传统锁相环的位置检测受到锁相环内部积分器初始值、检测起始角度、PID参数等因素的影响。因此考虑采

用柔性切换的方法实现从传统锁相环到改进锁相环位置检测的平滑过渡。

图15为初始角度 0.25π rad的仿真结果,在0.1 s时刻启动传统锁相环位置检测模块。由仿真结果,在0.1 s启动检测瞬间,采用了柔性切换的检测角度直接跟随到实际角度,误差基本为0;而传统锁相环的检测位置误差达到 π rad,在0.1~0.33 s约3个周期的时间才逐渐收敛到实际角度;改进锁相环在0.1 s启动检测误差也达到了 π rad,但是由于模糊校正PID使误差迅速减小,在0.1~0.13 s约0.5个周期就收敛到了实际角度。

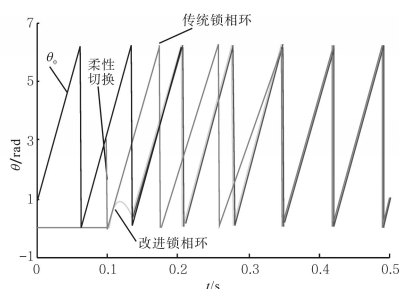


图15 柔性切换(初始角=0.25 π)

Fig.15 Flexible switching(initial angle=0.25 π)

图16为初始角度 0.5π rad的仿真结果,在0.1 s时刻启动传统锁相环位置检测模块。由仿真结果,在0.1 s启动检测瞬间,采用了柔性切换的检测角度直接跟随到实际角度,误差基本为0;而传统锁相环的检测位置误差达到 1.1π rad,在0.1~0.28 s约2个周期的时间才逐渐收敛到实际角度;改进锁相环在0.1 s启动检测误差也达到了 1.1π rad,但是由于模糊校正PID使误差迅速减小,在0.1~0.12 s约0.5个周期就收敛到了实际角度。

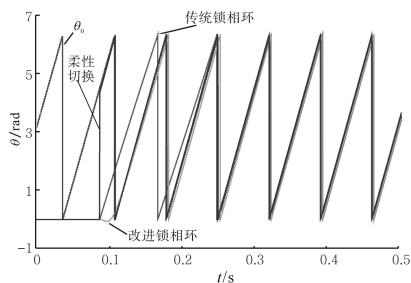


图16 柔性切换(初始角=0.5 π)

Fig.16 Flexible switching(initial angle=0.5 π)

5 结论

本文对调相机控制系统的高速位置检测方法进行了论述,通过加入积分、引入二阶广义积

分滤波器等方式对传统位置检测方法进行优化。介绍了模糊控制思想,并设计了位置检测模型的模糊校正PID控制器模型,将该控制器应用到改进锁相环位置检测模型中。为解决位置检测模块刚启动时误差较大的问题,引入了柔性切换的概念,通过动态因子实现了位置检测在低速模型和高速模型之间的柔性切换。仿真结果表明该控制策略可有效进行调相机低速和高速之间的切换。

参考文献

- [1] 王雅婷,张一弛,周勤勇,等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术,2017,41(1):22-28.
- [2] 戴庆忠. 同步调相机特性及应用[J]. 东方电气评论,2016,30(4):47-51.
- [3] 何志明,廖勇,向大为. 定子磁链观测器低通滤波器的改进[J]. 中国电机工程学报,2008,28(18):61-65.
- [4] 张海刚,张磊,王步来,等. 基于模糊PI滑模观测的PMSM位置检测[J]. 电气传动,2017,47(8):7-9.
- [5] Park Nachun, Kim Sanghoon. Simple Sensorless Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on High-frequency Voltage Injection Method[J]. IEEE Trans on Electric Power Applications,2014,08(2):68-75.
- [6] 李冉,龙雪涛,陈辉. 基于锁相环的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电气传动,2013,43(8):8-12.
- [7] 石祥建,牟伟,韩焦,等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力,2017,50(12):44-50.
- [8] Chihiro Hasegawa, Shoji Nishikata. A Sensorless Rotor Position Detecting Method for Self-controlled Synchronous Motors [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2008:1017-1021.
- [9] 杨波,李官军,胡旭光,等. 基于RTDS的抽水蓄能机组静止变频器启动技术研究[J]. 电气传动,2010,40(5):20-23.
- [10] 杨世勇,徐国林. 模糊控制与PID控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用,2011,30(11):21-25.
- [11] 孙增圻,邓志东,张再兴. 智能控制理论与技术[M]. 第2版[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [12] 李向明,陈红珍,刘明兰. 自校正自调整PID模糊控制器仿真研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2003,25(3):74-77.
- [13] 戈宝军,陶大军,董传友,等. 静止变频器启动抽水蓄能电机初始导通方案[J]. 电工技术学报,2013,28(11):147-154.
- [14] 金光哲,徐殿国,高强,等. 基于自适应复合控制的同步电机软启动自动准同期并网控制方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):93-98.
- [15] 张磊,高春侠. 改进型永磁同步电机全速度范围无传感器控制策略[J]. 电机与控制学报,2012,16(7):103-110.

收稿日期:2018-06-28

修改稿日期:2018-09-13