

本文全文线上首发由  
上海电机系统节能工程技术  
研究中心有限公司  
支持

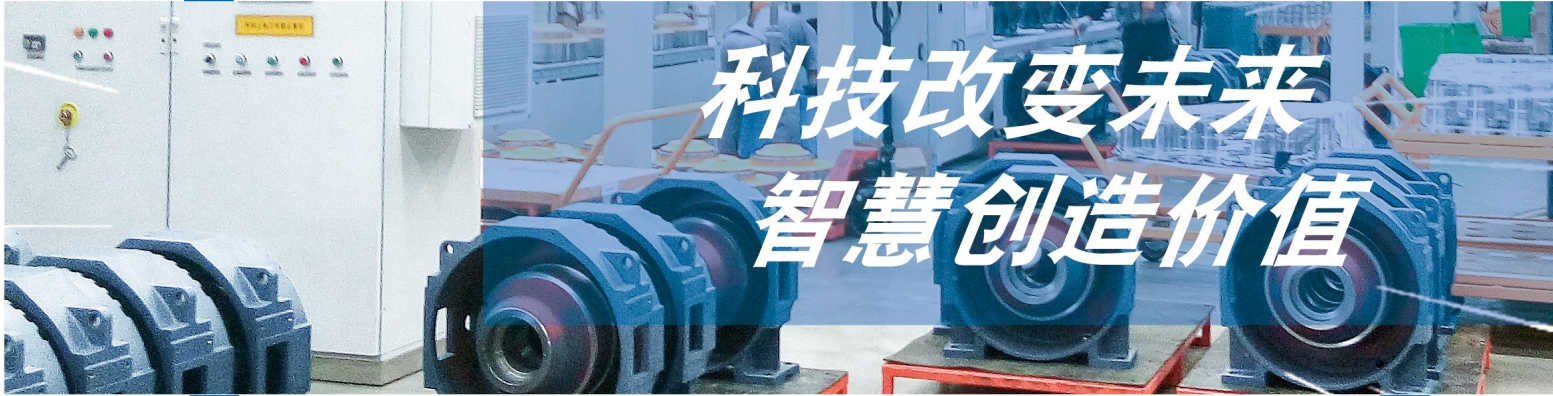
金立军,洪琪旭.  
一种基于PSS和模糊PID控制的运行工  
况波动下柴油发电机调速系统研究.  
电机与控制应用,2021,48(12):111.



SEARI  
上電科

NCMS  
上科电机

[www.nems.com.cn](http://www.nems.com.cn)  
掌握电机行业制造核心技术,  
辐射智能制造产业发展



科技改变未来  
智慧创造价值

## · 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 [www.nems.com.cn](http://www.nems.com.cn)

地址: 上海市武宁路505号 手机: 18918357509 电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904 邮箱: [wangcj@seari.com.cn](mailto:wangcj@seari.com.cn)

# 一种基于 PSS 和模糊 PID 控制的运行工况波动下柴油发电机调速系统研究

金立军<sup>1</sup>, 洪琪旭<sup>2,3</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804;

2. 同济大学 工程硕士管理中心, 上海 200092;

3. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

**摘要:** 核电厂柴油发电机需要具备起动速度快、有功功率大、供电时间长、可靠性高、带载性能好等特点, 而机组的调速系统作为机组的核心控制部件, 对机组的稳定可靠运行起着至关重要的作用。为解决柴油发电机在外电网运行状况波动时传统调速控制方法引起的低频振荡等问题, 提出了一种基于电力系统稳定器 (PSS) 和模糊 PID 控制的柴油发电机调速方法。基于 MATLAB Simulink 仿真软件搭建柴油发电机调速系统模型, 将实际工程运行数据与基于 PSS 和 PID 的转速控制方法进行仿真对比。结果表明该方法具有较高的适应性和鲁棒性, 不仅提高了柴油机转速的控制精度, 还加强了端电压与功率的稳定。

**关键词:** 柴油发电机; 电力系统稳定器; 模糊 PID 控制; 调速; 仿真

中图分类号: TM 31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)12-0111-09

doi: 10.12177/emca.2021.144

## Research on Diesel Generator Speed Regulatory Under Fluctuating Working Condition Based on PSS and Fuzzy-PID Control

JIN Lijun<sup>1</sup>, HONG Qixu<sup>2,3</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Engineering Master Management Center, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. China Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Jiaying 314300, China)

**Abstract:** Nuclear power plant diesel generators need to have the characteristics of fast start-up speed, large active power, long power supply time, high reliability, good load performance, and so on. As the core control component of the unit, the speed regulation system plays a crucial role in the stable and reliable operation of the unit. The low frequency oscillation exists in the traditional speed regulation control method for diesel generators with external power network fluctuation. To solve the problem, a kind of speed regulation method for diesel generators based on power system stabilizer (PSS) and fuzzy PID control is proposed. The diesel generator speed control system model is built based on MATLAB Simulink simulation software. The simulation results show that the proposed method has high adaptability and robustness, which not only improves the control precision of diesel engine speed, but also speeds up the stability of terminal voltage and power.

**Key words:** diesel generator; power system stabilizer; fuzzy PID control; speed control; simulation

收稿日期: 2021-10-19; 收到修改稿日期: 2021-11-23

作者简介: 金立军(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为输变电设备在线检测与故障诊断、高压技术等。

洪琪旭(1993—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制、核电厂电气设备调试等。

## 0 引言

柴油发电机是以柴油为主要燃料的应急供电设备,广泛应用于船舶、移动电站、医院等应急供电场所。由于核技术的特殊性,核电厂必须在任何运行工况下都确保核安全,因此对于应急柴油发电机提出了更高的要求。核电厂柴油发电机需要具备起动速度快、有功功率大、供电时间长、可靠性高、带载性能好等特点。作为目前国内最先进的百万千瓦级压水堆核电技术,华龙一号海外首堆建于巴基斯坦卡拉奇,一方面由于当地电网可靠性较差而导致电网频率波动范围大,柴油发电机在并网时容易失败;另一方面柴油发电机面临由于大容量负荷投退导致的运行工况波动时,传统调速系统容易出现低频振荡现象,从而导致电能输出不稳定,进而影响负载设备的性能。因此,设计一个可靠的调速系统来保证柴油发电机组的安全稳定运行是十分有必要的。

柴油发电机的转速是影响交流电压和频率的主要因素,受到喷油系统的喷油量和外界负载的影响,调速的本质即在外界负载变化时自动调节喷油量的大小<sup>[1]</sup>。当柴油发电机组的输出扭矩满足负载所需扭矩时,即处于稳定状态<sup>[2]</sup>。目前,传统的 PID 控制在柴油发电机的调速方面发挥了巨大的作用,如束长健等<sup>[3]</sup>基于传统 PID 控制算法、积分分离 PID 控制算法和模糊自适应控制算法对柴油机进行调速,通过仿真验证可得,模糊自适应 PID 控制有微小超调量,但是响应时间较短,在实时响应方面具有优越性。而大功率柴油发电机具有时变性、非线性和强耦合性等特点,且在变工况即加载情况下,需要一定的改进控制方式。因此,相关学者在传统 PID 控制的基础上提出了模糊 PID 控制、PID 神经网络控制等变体控制方法。杨勇等<sup>[4]</sup>在柴油发电机模糊控制调速的基础上,增加了转矩变化率、发电机端电压和功率因数等输入量,实现了单输入多输出的柴油发电机调速,提高了电力系统供电的稳定性。邹屹东等<sup>[5]</sup>提出了基于 PID 的迭代学习控制策略,利用跟踪收敛快的特性设计了柴油发电机的调速系统,具有很好的动态性能。揭海宝等<sup>[6]</sup>设计了基于变论域模糊 PID 的柴油机调速系统,与其余方法相比具有更快的响应速度、更好的稳定性和自适应性。张艳等<sup>[7]</sup>设计了

基于模糊径向基函数(RBF)神经网络的柴油发电机组转速 PID 控制器,具有很好的稳定性和抗干扰能力。李宗营等<sup>[8]</sup>建立了一种具有自适应功能的径向基神经网络 PID 调速系统,解决了切换过程转速波动大、调速效果不理想等问题。

上述研究为传统柴油发电机调速的研究提供了坚实的理论基础,但没有考虑由调速系统引起的弱阻尼低频振荡问题,无法提供令人满意的阻尼特性。特别是用于控制大型柴油发电机组时,无论是区域间低频振荡还是局部低频振荡,都会给系统稳定性带来极大的威胁<sup>[9]</sup>。李建国等<sup>[10]</sup>对产生低频振荡的原因进行了分析,认为机械阻尼不足是造成低频振荡的主要原因。只要提高机组的机械阻尼,就能有效抑制低频振荡的发生、发展,甚至可以平息振荡。在系统中配置电力系统稳定器(PSS)是抑制低频振荡最基本的方法,该方法是目前抑制阻尼低频振荡最有效的方法。蒋平等<sup>[11]</sup>提出了区域振荡模式,通过在发电机上安装 PSS 进行阻尼控制,取得了很好的低频振荡抑制效果。李传栋等<sup>[12]</sup>设计了一种基于广域测量信号的电力系统稳定器,并利用粒子群算法对其参数进行优化,使得广域测量电力系统稳定器在区域间功率振荡的阻尼最大,达到更好的抑制区间振荡的作用。江崇熙等<sup>[13]</sup>针对调速系统引起的弱阻尼振荡问题,提出了一种多频段电力系统稳定器,在抑制低频振荡的同时确保系统的调速性能满足要求。

为提高控制精度,减小低频振荡,本文设计了一种基于 PSS 和模糊 PID 控制的运行工况波动下柴油发电机调速系统。利用模糊 PID 控制对柴油发电机组的转速进行控制,并利用 PSS 对调速系统引起的弱阻尼低频振荡问题进行抑制,并且加快发电机端电压的恢复。为验证所提调速方法的有效性,本文采用柴油发电机的线性模型,在不同工况下进行了仿真。

## 1 问题描述

柴油发电机以柴油为主燃料,带动发电机发电,将柴油的化学能转化为电能。柴油发电机组包括柴油发动机、柴油执行器和发电机三部分。其调速系统一般由转速变化的传感器、控制器、执行器、外部监控系统、电源等部分组成。为减小超调量和反应时间,柴油发电机的控制结构采用转

速和齿条位置的双闭环控制<sup>[14]</sup>。调速系统经过预定的采样间隔时间,采集转速设定信号和柴油机转速反馈信号,并将两者进行比较。若两者之间存在偏差,通过转速环控制算法进行计算,作为齿条位置的目标信号,再将其与位置传感器采集到的位置信息进行比较。最后,通过位置环控制算法计算驱动信号,来驱动执行器动作,调节柴油发电机的供油量,达到调速的目的,该系统的组成如图 1 所示。

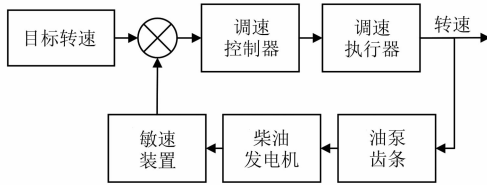


图 1 柴油机调速系统的组成

柴油发电机转速受到转矩、电压、励磁磁通等因素的影响,其转速变化是一个非稳态的过程,常用 PID 算法对其进行控制,其表达式为:

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 为 PID 控制的输出转速; $e(k)$ 为输出转速与目标转速之间的差别; $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为比例系数、积分系数和微分系数。

传统的 PID 控制无法实时调整参数,因此,本文采用模糊 PID 算法对柴油发电机的转速进行控制。此时,模糊 PID 算法的表达式为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i(k)x(k) + K_d(k) [e(k) - e(k-1)] \quad (2)$$

式中: $x(k)$ 为状态变量,表征柴油发电机的转速状态,即  $x(k) = x(k-1) + e(k-1)$ 。

当柴油发电机的运行工况波动时,上述调速系统的阻尼较弱导致低频振荡,以经典同步柴油发电机为例,其发电机的电磁功率与电机功角之间的关系为

$$P_e = m \frac{UE_0}{X_d} \sin\delta \quad (3)$$

式中: $P_e$ 为发电机的电磁功率; $m$ 为柴油发电机的相数; $X_d$ 为柴油发电机的同步电抗; $\delta$ 为发电机功角,即柴油发电机定子与转子之间的夹角。

功角的变化表明转子与定子发生了相对运

动,即定子气隙与转子气隙出现了偏差,发电机机械转矩与功角之间的关系为

$$T_1 - T_0 = C \sin\delta + K \frac{d\delta}{dt} + \frac{J}{p} \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad (4)$$

式中: $T_1$ 为柴油机最大机械转矩; $T_0$ 为柴油发电机空载时的转矩; $C$ 、 $K$ 为功角系数; $p$ 为发电机的极对数。

由式(4)可得,柴油发电机的功角变化是各种转矩共同作用的结果,即转矩变化是引起柴油发电机低频振荡的原因。

因此, $T_1$ 突变是引起柴油发电机低频振荡的机械因素,稳定状态下电磁转矩为

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = m \frac{p}{\omega_1} \frac{EU}{X_d} \sin\delta \quad (5)$$

式中: $T_e$ 为柴油发电机的电磁转矩; $\omega$ 为转子机械角频率; $\omega_1$ 为转子电气角频率。

由式(5)可得,当柴油发电机的电磁转矩波动时,会引起功角波动,进而使柴油发电机出现低频振荡的问题。

在振荡过程中,功角的波动幅度随时间衰减即表明功角有抑制其波动的正向阻尼作用,如图 2 所示。

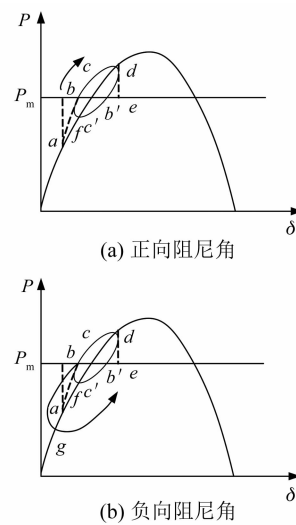


图 2 阻尼角与功角特性的关系

图 2 描述了功角特性对低频振荡的影响,如图 2(a)所示当正向阻尼时,功角特性沿着  $abcdeb'c'f$  的路径运动,在前半段功角上升,阻力转矩较小,抑制了功角变大的趋势,在后半段功角下降,阻力转矩减小,抑制了功角减小的趋势。如图 2(b)所示,

当负向阻尼时,功角特性沿着  $afc'b'edcb$  的路径运动,在前半段功角上升,放大了功角变大的趋势,在后半段功角下降,放大了功角变小的趋势。

因此,要抑制柴油发电机的低频振荡问题,就要增强柴油发电机转子的正向阻尼转矩。而 PSS 可以通过产生附加转矩  $\Delta T_{ss}$  来增强柴油发电机转子的正向阻尼,对柴油发电机的低频振荡产生抑制效果。因此,本文引入了 PSS 来抑制柴油发电机在调速过程中产生的低频振荡问题。

## 2 一种 PSS 和模糊 PID 控制的调速方法

柴油发电机在转速控制时,存在低频振荡的问题,无法在不同运行工况下迅速调节柴油发电机的控制参数,极大地影响了柴油发电机的性能。要抑制柴油发电机的低频振荡问题,就要增强柴油发电机转子的正向阻尼转矩。而 PSS 可以通过产生附加转矩来增强柴油发电机转子的正向阻尼,对柴油发电机的低频振荡产生抑制效果。本文引入了电力系统稳定器来抑制柴油发电机在调速过程中产生的低频振荡问题。且模糊控制可以根据不同的运行工况自适应调整控制器的参数。因此,本文设计了一种基于 PSS 和模糊 PID 控制的运行工况波动下柴油发电机调速系统。

### 2.1 模糊-PID 调速系统

#### 2.1.1 模糊-PID 原理

模糊控制器根据人工控制规则组织控制策略,根据该策略决定控制量的大小,不要求掌握被控对象的精确数学模型。在柴油发电机运行工况发生变化时,仍能有效控制转速,具有鲁棒性好、适应性强等优点。

柴油发电机在运行状况改变时,传统的 PID 调速器不能根据负载的变化及时做出最优的调整。模糊-PID 控制系统主要由参数可变的 PID 控制器和模糊控制器两部分组成,该方法通常以柴油发电机的转速差  $e$  和转速差变化率  $ec$  作为输入量,以 PID 参数的变化量作为输出量,实现 PID 参数的模糊自适应优化<sup>[15]</sup>,其结构如图 3 所示。

模糊-PID 参数的优化原理是找出 PID 三个参数与转速差  $e$  和转速差变化率  $ec$  之间的模糊关系,并根据模糊控制原理对 PID 的参数进行修

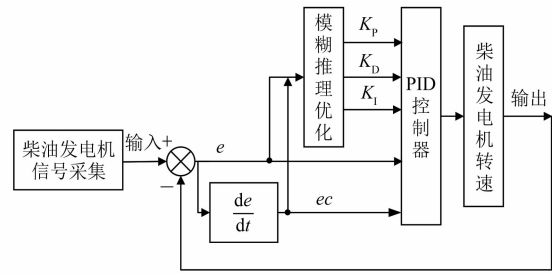


图 3 模糊 PID 控制原理图

改,使得柴油机有较好的动、静态性能<sup>[16]</sup>。

在柴油机运行过程中,往往存在多个运行工况,按照二输入三输出的模糊控制规则推导,通过式(6)计算当前的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  三个参数,并由 PID 控制器输出:

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \Delta K_p \times f_p \\ K_i = KK'_i + \Delta K_i \times f_i \\ K_d = KK'_d + \Delta K_d \times f_d \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $K'_p$ 、 $KK'_i$ 、 $KK'_d$  为 PID 控制器的初始参数;  $f_p$ 、 $f_i$ 、 $f_d$  为修正系数;  $\Delta K_p$ 、 $\Delta K_i$ 、 $\Delta K_d$  为模糊控制器输出的比例、积分、微分的增量。

柴油发电机模糊-PID 调速系统在传统的 PID 调速系统的基础上,通过对采样值与给定值进行比较得到偏差信号,经模糊规则推理,计算当前系统误差  $e$  和误差变化率  $ec$  对参数进行调整,具体流程如图 4 所示。

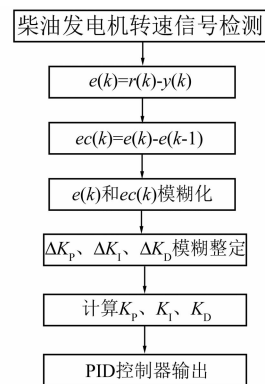


图 4 模糊 PID 控制流程图

其中,  $r(k)$  为预期的转速,  $y(k)$  为柴油发电机的实际转速。

#### 2.1.2 模糊化规则

在模糊-PID 控制系统中,超调率和瞬时调速率须控制在 5%,而柴油机转速的变化范围通常

为 $[-1\ 500\ \text{r/min}, 1\ 500\ \text{r/min}]$ 。转速偏差 $e$ 的范围为 $[-75\ \text{r/min}, 75\ \text{r/min}]$ , 将其等分为8份, 量化因子为 $0.05^{[17]}$ 。柴油机转速偏差 $e$ 的变化范围在模糊集上的论域为

$$e = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\} \quad (7)$$

同理, 转速差变化率 $ec$ 的变化范围在模糊集上的论域为

$$ec = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\} \quad (8)$$

通过比例因子将模糊集合论域转换到控制量基本论域, 比例因子为1, 则柴油机输出量 $U$ 的变化范围在模糊集上的论域为

$$U = \{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\} \quad (9)$$

模糊子集用负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大七个状态表示, 并用相应的字母表示:

$$e, ec, U = \{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\} \quad (10)$$

隶属度函数可以对模糊概念进行定量的描述, 本文采用三角形和梯形相结合的隶属度函数, 如图5所示。

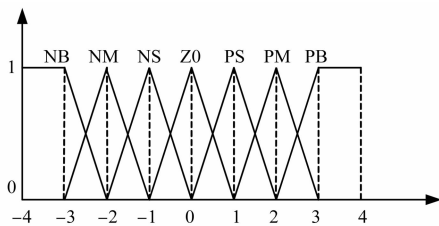


图5 隶属度函数

### 2.1.3 模糊推理

通过模糊规则对模糊量进行模糊推理即可得到模糊输出量, 柴油发电机每一种运行工况代表一种模糊化规则:

(1) 当初始转速差 $e$ 较大, 且其误差变化率 $ec$ 为负时, 转速有下降的趋势, 输出转速应趋向于给定的转速值;

(2) 当初始转速差 $e$ 较大, 且其误差变化率 $ec$ 为正时, 转速有上升的趋势, 输出转速应远离给定的转速值;

(3) 当初始转速差 $e$ 较小, 且其误差变化率 $ec$ 为负时, 转速有下降的趋势, 输出转速应远离给定的转速值;

(4) 当初始转速差 $e$ 较小, 且其误差变化率 $ec$ 为正时, 转速有上升的趋势, 输出转速应趋向于

给定的转速值。

本文中的模糊控制器有两个输入, 即转速差 $e$ 和转速误差变化率 $ec$ , 每个输入对应七种模糊子集, 控制规则如表1~表3所示。

表1  $\Delta K_p$  模糊规则表

		$ec$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e$	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表2  $\Delta K_i$  模糊规则表

		$ec$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表3  $\Delta K_D$  模糊规则表

		$ec$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e$	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZE
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZE	ZE
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

### 2.1.4 反模糊化

本文采用重心法对模糊控制量进行反模糊化, 即取横坐标与模糊隶属度函数曲线围成面积的重心作为代表这个模糊集合的代表点, 设输出的柴油机转速模糊集为

$$U = u(-s)/(-s) + u(-s+1)/(-s+1) + \dots + u_0/0 + \dots + u(s-1)/(s-1) + u_i/s \quad (11)$$

式中:  $s$  为拉普拉斯变量。

则通过重心法求解的代表点即所求柴油机转速:

$$u = \left( \sum_{i=-s}^s i \cdot u_i \right) / \sum_{i=-s}^s u_i \quad (12)$$

### 2.2 PSS 稳定器抑制低频振荡

在对柴油发电机进行调速控制时,由于运行工况的波动等,单纯的 PID 控制无法提供令人满意的阻尼特性,往往会引起低频振荡等问题,影响柴油发电机的稳定运行。因此,本文采用 PSS 抑制柴油发电机的功率振荡,在柴油发电机运行工况波动时,起到稳定柴油发电机端电压的作用,具体控制框图如图 6 所示。

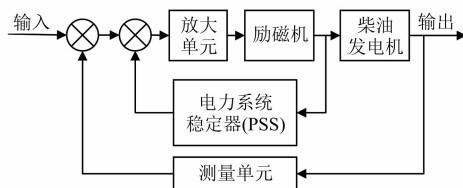


图 6 带 PSS 的柴油发电机系统示意图

PSS 在自动电压调节的基础上,将柴油发电机的转速偏差信号经过处理后作为附加的控制,产生与柴油发电机同轴的附加力矩,提高低频振荡的阻尼,从而起到抑制低频振荡的作用<sup>[18]</sup>。PSS 环节由测量环节、超前滞后环节和隔直环节构成,如图 7 所示。

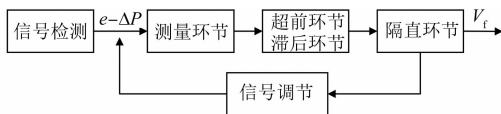


图 7 PSS 稳定器模型示意图

PSS 的测量环节对传感器采集到的信号进行测量和滤波,超前滞后环节对相位进行补偿,当柴油发电机的转速变化达到稳态时,隔直环节可以使 PSS 的输出为零,当柴油发电机的运行工况波动导致转速变化不稳定时,隔直环节使 PSS 的输出对转速进行调节以达到稳定状态。PSS 通常以转速差  $e$  作为输入信号,使用超前网络,在高频段增加增益,对柴油机振荡极为敏感,使得系统低频

振荡更加严重;以功率偏差  $\Delta P$  作为输入信号,检测方便,稳定性好,但是存在反调等问题;以转速差  $e$  和功率偏差  $\Delta P$  作为输入信号,可以减小反调现象,相互补偿,只需对增益进行调节,即可产生相位超前的附加同步转矩。因此,本文以功率偏差和转速偏差同时作为 PSS 的输入信号,具体模型如图 8 所示。

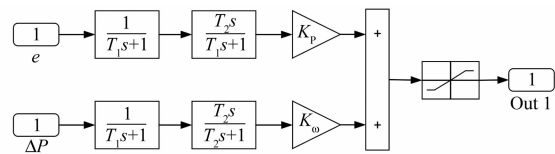


图 8 PSS 稳定器模型

### 2.3 所提方法框架

柴油发电机在运行状况波动时,模糊-PID 控制转速的传递函数也会发生变化,传统的调速控制方法会引起系统低频振荡等问题。因此,本文提出了一种基于 PSS 和模糊-PID 控制的运行工况波动下柴油发电机转速控制方法,在准确控制柴油机转速的同时解决了调速系统引起的低频振荡问题,该方法流程如图 9 所示。

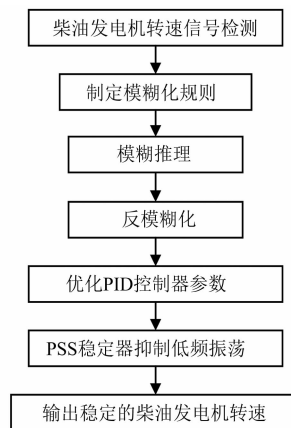


图 9 基于 PSS 和模糊 PID 控制的转速控制方法

## 3 仿真实验

为了验证基于 PSS 和模糊 PID 控制的柴油发电机转速控制方法的有效性,根据华龙一号海外首堆应急柴油发电机实际工程数据,搭建仿真程序,其参数如表 4 所示。

在 MATLAB/Simulink 中进行了仿真。该柴油发电机为一阶惯性加延迟环节的柴油机发动

机,其传递函数为

$$G_g(s) = \frac{K_\eta}{T_g s + 1} e^{-\tau s} \quad (13)$$

式中: $T_g$  为柴油机的惯性时间系数; $K_\eta$  为柴油机的放大常数; $\tau$  为柴油机模型的滞后时间。

表 4 柴油发电机单机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	8 300
额定电压/kV	6.6
额定电流/A	908
额定频率/Hz	50
额定功率因数	0.8
相数	3
外形尺寸/mm	13 430×3 750×4 500
机组重量/t	167/175

柴油执行器由比例电磁铁和回位弹簧构成,可以调节柴油机喷嘴的移动位置,可将其视为一阶惯性环节,其传递函数为

$$G_d(s) = \frac{K}{T_k s + 1} \quad (14)$$

式中: $T_k$  为电磁执行器的惯性时间系数; $K$  为脉冲调制占比与喷嘴齿条位置的关系常数。

电能通过发电机输出,本文中发电机采用一阶线性模型,其传递函数为

$$G_a(s) = \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (15)$$

式中: $T_a$  为发电机的惯性时间系数; $e_g$  为发电机的自调节系数。

采用模糊 PID 控制算法,并结合了 PSS 稳定器设计机侧控制器。分别根据加载需求进行了分步加载,为了达到工程加载需求验证的目的,仿真中使用实际工程中华龙一号单机加载序列,从多个性能评估了柴油发电机的控制性能,并与基于 PSS 和 PID 的控制方法进行了对比。

图 10 为不同控制方法下柴油发电机速度控制对比图,其中,图 10(a)为基于 PSS 和模糊 PID 控制的柴油发电机转速,图 10(b)为基于 PSS 和 PID 控制的柴油发电机转速变化。通过对比可得基于 PSS 和模糊 PID 控制的柴油发电机转速,可以快速收敛到所需转速,且转速波动较小,具有更高的控制精度。在不同加载时间段,基于模糊

PID 的速度控制器的转速控制跌落误差和恢复能力,均优于基于传统 PID 速度控制器方法,这将提高实际工程中柴油发电机的转速调节性能和整机系统鲁棒性。

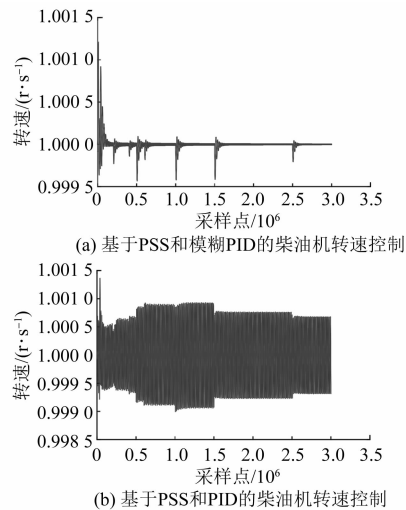


图 10 不同控制方法下柴油机速度控制对比图

图 11 为不同控制方式下柴油发电机三相电流对比图,其中,图 11(a)为两种控制方式下柴油机单相电流对比,图 11(b)为两种控制方式下柴油机单相电流局部对比。通过对比可得,虽然两种方法的单相电流幅值相差较小,且正弦特性都较好,但基于 PSS 和 PID 控制的柴油发电机的三相电流波动较大,而基于 PSS 和 PID 控制的柴油发电机的三相电流波动小,在谐波抑制上更有利于柴油发电机系统稳定。

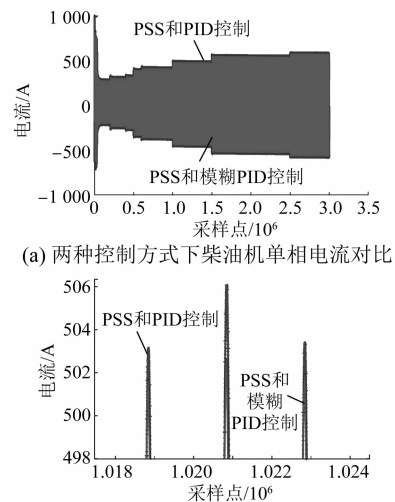


图 11 不同控制方法下柴油机单相电流对比图



图 12 为不同控制方式下柴油发电机加载百分比的对比图,其中,图 12(a)为基于 PSS 和模糊 PID 控制的柴油发电机的加载百分比,图 12(b)为基于 PSS 和 PID 控制的柴油发电机的加载百分比。通过对比可得,基于 PSS 和模糊 PID 的柴油机加载过程波动小,调速过程更加稳定。这十分利于在线加载时计算线上总负荷,以及更为准确地配给母线上的剩余负荷。

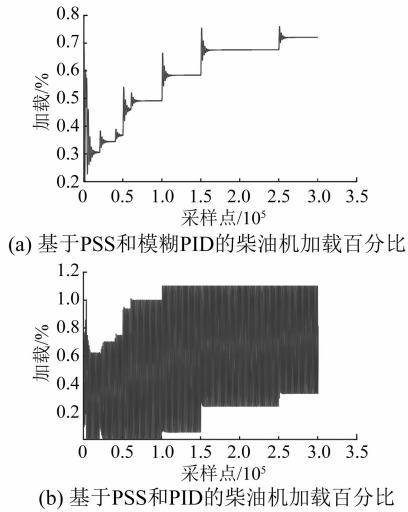


图 12 不同控制方法下柴油机加载百分比对比图

图 13 为不同控制方式下柴油发电机有功功率和无功功率的对比图,其中,图 13(a)为两种控制方法下的有功功率对比图,图 13(b)为两种控制方法下有功功率的放大对比图,图 13(c)为两种控制方法下的无功功率对比图,图 13(d)为两种控制方法下无功功率的放大对比图。通过对比可得,基于 PSS 和模糊 PID 的柴油机调速过程中,有功、无功功率的波动较小,且无功功率相比于基于 PSS 和 PID 的方法更加平滑,有利于柴油发电机稳定运行。

图 14 为不同控制方式下 PSS 稳定器输入信号的对比图,其中,图 14(a)为基于 PSS 和模糊 PID 控制的 PSS 稳定器输入信号,图 14(b)为基于 PSS 和 PID 控制的 PSS 稳定器输入信号。图 15 为不同控制方式下 PSS 稳定器输出信号的对比图,其中,图 15(a)为基于 PSS 和模糊 PID 控制方法下 PSS 的输出信号,图 15(b)为 PSS 和 PID 控制方法下 PSS 的输出信号。通过图 14 和图 15 中(a)和(b)对比可得,基于模糊 PID 的控制方

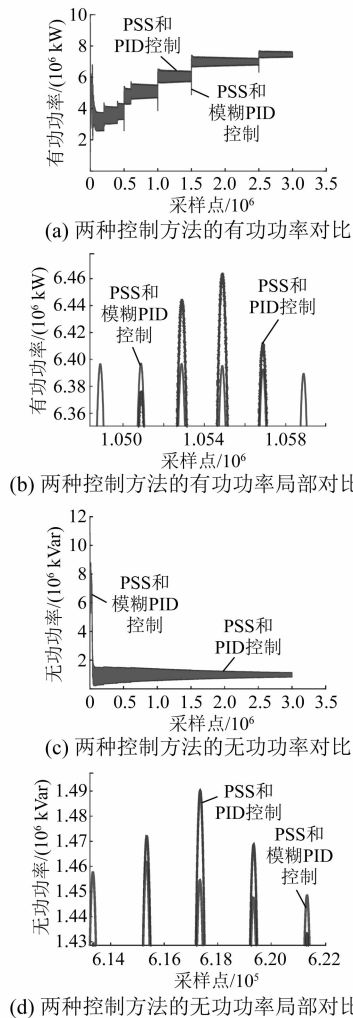


图 13 不同控制方法下柴油机有功、无功功率对比图

法,在柴油发电机的调速过程中对速度的控制更加稳定和精确。

### 4 结 语

柴油发电机在运行状况改变时,传统的调速控制方法会引起系统低频振荡等问题。本文提出了一种基于 PSS 和模糊-PID 控制的运行工况波动下柴油发电机转速控制方法,解决了调速系统引起的低频振荡问题。通过模糊-PID 控制对柴油发电机的转速进行控制,具有较高的适应性和鲁棒性,提高了控制精度,并利用 PSS 对调速系统引起的弱阻尼低频振荡问题进行抑制,并且加快发电机端电压的恢复,减小甚至避免了调速系统带来的低频振荡问题。为验证所提柴油发电机调速方法的有效性,本文搭建了柴油发电机的线性

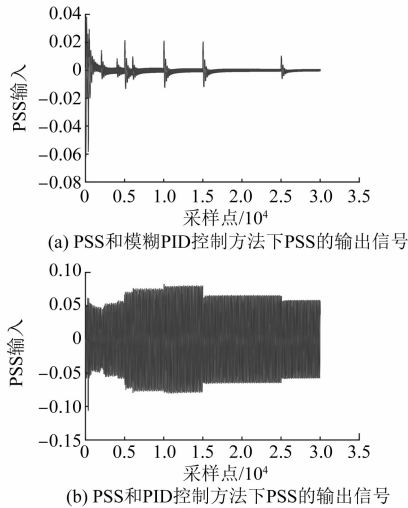


图 14 PSS 稳定器输入信号对比图

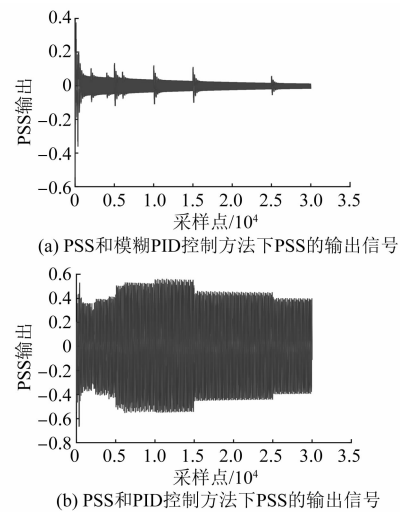


图 15 PSS 稳定器输出信号对比图

模型,在不同工况下进行仿真,仿真结果验证了本文所提基于 PSS 和模糊 PID 控制的柴油发电机转速控制方法具有较高的调速精度,减小了达到稳态所需的时间,且在调速过程中没有出现超调现象,大大提高了运行工况变化时系统的鲁棒性。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 张华兵,陈志忠,徐建新. 柴油机喷油器针阀落座过程的冲击应力分析[J]. 柴油机, 2013, 35(2): 18.
- [ 2 ] WAGNER J R, DAWSON D M, LIU Z. Nonlinear air-to-fuel ratio and engine speed control for hybrid vehicles [ J ]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(1): 184.
- [ 3 ] 束长健,曾洁,邹娟,等. 基于模糊自适应 PID 控制的柴油机调速模型仿真研究[J]. 铁道机车与动车, 2020(1): 9.
- [ 4 ] 杨勇,李岚. 基于转矩变化率与模糊控制的柴油发电机调速[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 71.
- [ 5 ] 邹屹东,钱晶,曾云,等. 柴油发电机调速系统迭代学习控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 82.
- [ 6 ] 揭海宝,康积涛,李平. 基于变论域模糊 PID 控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 101.
- [ 7 ] 张艳,郭凯,丁茂森. 船舶柴油发电机组转速的模糊 RBF 神经网络 PID 控制[J]. 船电技术, 2014, 34(5): 1.
- [ 8 ] 李宗营,马传杰,杨传雷,等. RBF 神经网络对 STC 柴油机调速系统性能改善研究[J]. 应用科技, 2018, 45(5): 102.
- [ 9 ] 贾文阁,谭胜盛,翟长春,等. 核电厂应急柴油机组低频振荡及应对措施[J]. 中国核电, 2019, 12(6): 631.
- [ 10 ] 李建国,李福利. 电力系统稳定器抑制低频振荡的原理与应用[J]. 水利技术监督, 2016, 24(6): 103.
- [ 11 ] 蒋平,栗楠,顾伟,等. PSS 和 SVC 联合抑制特高压网络低频振荡[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 13.
- [ 12 ] 李传栋. 抑制区间低频振荡的电力系统稳定器设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(5): 134.
- [ 13 ] 江崇熙,石鹏,黄伟,等. 考虑多振荡模式的多频段电力系统稳定器参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 142.
- [ 14 ] 王钊. 基于模糊控制的柴油机转速控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- [ 15 ] 刘宗锋,荣德慧,王世国,等. 永磁同步电机模糊 PID-内模控制系统研究[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 85.
- [ 16 ] 陆浩,周杰娜,卢江宇杰,等. 基于 Fuzzy-PID 控制的柴油发电机调频研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(6): 9.
- [ 17 ] 孙立晶. 基于模糊-PID 算法的柴油机调速控制策略设计与研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2010.
- [ 18 ] 宋墩文,杨学涛,丁巧林,等. 大规模互联网低频频振荡分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 22.