

同步发电机励磁功率单元中可控整流桥的故障工况研究*

李啸骢, 冀晓诚, 彭 诚, 徐俊华, 龚 彪, 赵能能, 段 婷, 张焕博, 袁睿智
(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘 要: 分析了三相全控桥式整流电路的各种故障工况, 得出故障下触发角与输出励磁电压之间的定量关系, 并提出了相应的解决措施。通过对 MATLAB/Simulink 搭建的同步发电机励磁功率单元模型进行仿真, 结果表明, 所提措施能有效减轻故障对系统的不利影响, 在脉冲丢失时, 可以为备用设备切换赢得时间; 晶闸管发生故障时, 有利于调控发电机平稳退出运行以避免产生稳定性问题。

关键词: 励磁功率单元; 三相全控桥式整流电路; MATLAB/Simulink; 触发角

中图分类号: TM 306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0112-06

Research of Controlled Rectifier Bridge of Synchronous Generator Excitation Power Unit in Fault Condition*

LI Xiaocong, JI Xiaocheng, PENG Cheng, XU Junhua, GONG Biao,
ZHAO Nengneng, DUAN Xu, ZHANG Huanbo, YUAN Ruizhi
(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: This paper analyzed different faults of three phase full controlled bridge rectifier circuit, gets the quantitative relationship between trigger angle and output excitation voltage, proposes relevant measure, and then simulates the model of excitation power unit by using MATLAB/Simulink platform. The results showed that the proposed method can effectively reduce the adverse effects of the fault on the system and obtain time for switching standby devices when pulses disappear or make for controlling generators existing smoothly to avoid stability problems when thyristors break down.

Key words: power unit of excitation system; three phase full controlled bridge rectifier circuit; MATLAB/Simulink; control trigger angle

0 引 言

励磁的技术性能对同步发电机组的安全运行有着重大意义^[1]。很多运行工况下, 发电机的稳定运行都与励磁密切相关^[2-8]。励磁系统由励磁功率单元和励磁控制单元(即励磁控制器)两

部分组成。励磁功率单元包括可控整流装置及其交流电源, 其中整流装置的主要任务是将交流源转换成直流源, 供给同步发电机或励磁机的励磁绕组。整流单元应能稳定地为同步发电机持续提供各种运行工况下所需要的励磁电流, 从而确保同步发电机的正常运行^[9]。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51267001); 广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118338); 广西科学研究与技术开发计划项目(14122006-29); 南宁市科学研究与技术开发计划项目(20165186)

作者简介: 李啸骢(1959—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制系统计算机辅助设计、电力系统动态仿真及计算机实时控制, 电力系统分析与控制, 电力系统非线性控制。

冀晓诚(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

彭 诚(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析。

自并励励磁系统中通常选用三相桥式全控整流电路,结构简单、可靠性高,广泛应用于大型机组^[9]。桥式电路中采用的晶闸管整流器(Silicon Controlled Rectifier, SCR)价格低廉且能满足绝大多数控制需要,大量应用在现行励磁系统中^[10-11]。

励磁控制的原理是对励磁功率单元移相脉冲触发角进行改变^[9]。在微机励磁控制器中,移相脉冲触发模块的控制电压以数字信号的形式发出,励磁控制规律计算出的结果最终要转换为角度或者时间表示的触发时刻,因此分析触发角和励磁功率单元输出的直流励磁电压之间的关系(忽略对整流电压输出的滤波,即认为励磁电压是脉动直流量),控制与限制脉冲故障情况下的触发角,对励磁控制理论的完善有重大意义。本文以此为出发点,以生产中常见的晶闸管三相全控桥式整流电路为例,分析励磁电压和触发角在正常工况和故障工况下的关系。

常见的整流电路故障诊断方法有:谱分析法,字典库诊断方法,基于神经网络、小波理论故障诊断方法以及直接检测功率器件两端电压或桥臂电流方法。由于目前监控系统日趋完善,直接检测法避免复杂的计算,能够通过平均值法或电流矢量相角法及时检测到故障类型。在微机励磁交流采样中,平均值法计算简单,运算速度快,能够有效缩短故障判断的时间,而且可以方便控制触发角与励磁电压关系的公式推导,故本文采用基于平均值的直接检测法进行故障诊断分析。

1 晶闸管三相桥式全控整流电路

励磁功率单元中三相全控桥式整流电路原理图如图1所示。6个晶闸管分为共阴组VT1、VT3、VT5和共阳组VT2、VT4、VT6两组,励磁绕组相当于电阻与电感的串联的阻感负载。

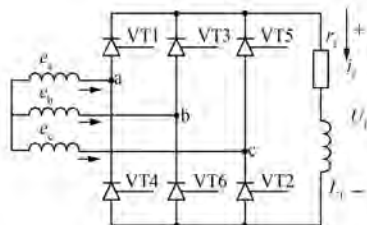


图1 三相全控桥式整流电路原理图

图1中输出励磁电压 u_f 与线电压关系为

$$u_f = \begin{cases} e_{ab} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t + 30^\circ) \\ e_{ac} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t - 30^\circ) \\ e_{bc} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t - 90^\circ) \\ e_{ba} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t - 150^\circ) \\ e_{ca} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t + 150^\circ) \\ e_{cb} = \sqrt{2}E_{ab}\sin(\omega t + 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: e_{ab} 、 e_{ac} 、 e_{bc} 、 e_{ba} 、 e_{ca} 、 e_{cb} ——励磁变压器二次侧线电压瞬时值;

E_{ab} ——励磁变压器二次侧线电压有效值;

ω ——发电机角频率。

两组晶闸管都需触发脉冲控制换流,上、下两组晶闸管必须各有且只有1只晶闸管同时导通,整流电路才能正常工作,导通顺序为VT1~VT6。以 α 表示触发角,各晶闸管脉冲触发相位应依次相间 60° 。在这种情况下, $\alpha=0^\circ$ 时,各晶闸管触发脉冲于自然换相点时发出,每周导通持续 120° ; $\alpha=60^\circ$ 时,各相正、负侧晶闸管的触发脉冲滞后于自然换相点 60° ; $\alpha<60^\circ$ 时,输出脉动直流励磁电压瞬时值 u_f 都大于零,为连续波形; $\alpha\leq 90^\circ$ 时,输出平均励磁电压 U_f 非负,桥式电路处于整流状态,进行交流向直流的转化; $90^\circ<\alpha\leq 180^\circ$,输出电压平均值 U_f 为负,三相桥电路工作在逆变状态,将直流转化为交流。

输出励磁电压 u_f 的波形在一周期内脉动6次且脉动的波形相同。可得到励磁电压平均值 U_f 为

$$U_f = 1.35E_{ab}\cos\alpha \quad (2)$$

2 励磁功率单元正常工况仿真分析

自并励励磁是现今大型机组的定型励磁方式。微机自并励励磁控制系统整体结构图如图2所示。

针对图2所示模型,在Simulink^[12-13]平台进行仿真,利用SimPowersystems元件库中的晶闸管等元件,即可搭建三相全控桥整流电路。

本文主要工作是研究三相全控桥的原理及不同触发角下的波形,重点在励磁功率单元中的整流桥及其相关缓冲电路、驱动电路等。为将仿真模型与图2形象结合,采用子系统环节,将三相电源代替同步发电机,脉冲触发信号象征性表示

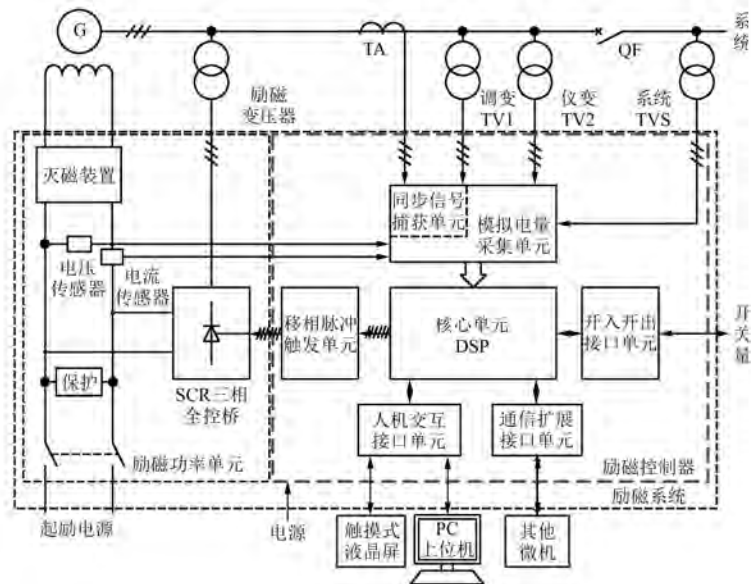


图 2 微机自并励励磁控制系统

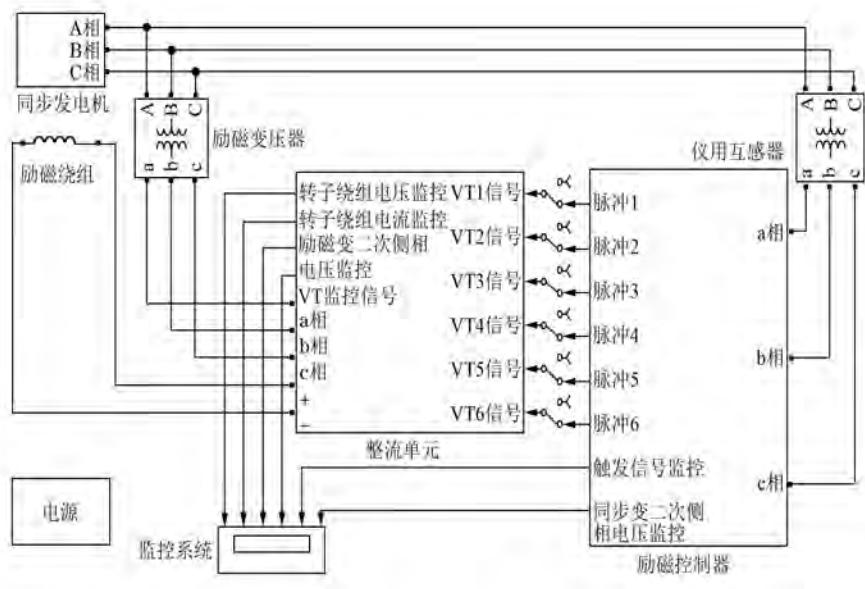


图 3 自并励励磁系统 Simulink 仿真图

励磁控制器,通过多路测量器和示波器相互作用,象征性表示触摸屏、上位机等监控系统。

模型中元件参数如下:三相电源(代表发电机):电压峰值311.13 V,相位差120°,50 Hz;励磁变压器:D11/Y接线,变比380 V/173 V,忽略变压器漏感;仪用互感器:D11/Y接线,380 V/10 V;阻感负载(表示励磁绕组): $R=5\ \Omega$, $L=15\ \text{H}$;脉冲触发器:50 Hz,脉宽10°,双脉冲触发;晶闸管本身缓冲电路带阻感负载,电感电流存在上升时间,初期波形会不稳定,时间选取应稍大。综合考虑,设置仿真时长为50 s,观察前两个周期波形。

针对式(2)对触发角在45°情况下进行MATLAB仿真验证,如图4所示。

仿真结果与前面的定性分析和定量分析一致,在0~90°期间,励磁绕组的电压和电流都是正值,且随着触发角增大而减小,说明全控桥式电路工作在整流励磁状态。在实际自并励微机励磁控制中,选取合适的基准值,则励磁控制的输出等于

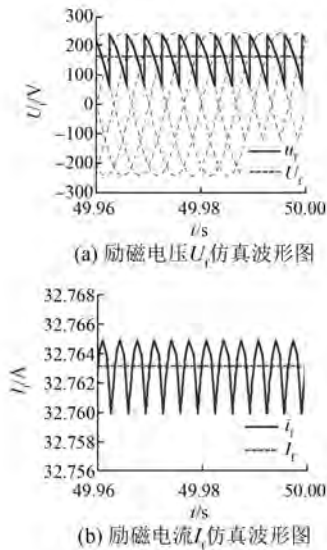


图4 励磁电压、电流仿真波形图(\$\alpha=45^\circ\$)

励磁电压,再根据机端电压与励磁电压关系,由电压给定值按照式(2)中反解求出 \$\alpha\$,改变脉冲触发时刻,即可达到控制要求。

3 励磁功率单元故障工况仿真分析

由于3个及以上晶闸管同时故障或脉冲丢失的情况发生的概率很低,故仅考虑一个或两个晶闸管的故障状态。共有一个晶闸管故障、上下两臂同相两晶闸管故障、上下两臂不同相晶闸管故障、同臂两晶闸管故障4种故障工况^[14]。

通过对一个周期内励磁电压瞬时值积分求平均值,可以得到励磁电压平均值与触发角的关系,如式(3)~式(6)。值得注意的是,对于故障工况II,励磁电压瞬时值频率为工频2倍,可只需对0.01s进行积分。

(1) 故障工况1:某一晶闸管故障(以VT6为例)。

$$U_f = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\alpha+30^\circ} e_{ca} d\omega t + \int_{\alpha+90^\circ}^{\alpha+150^\circ} e_{ac} d\omega t + \int_{\alpha+150^\circ}^{\alpha+210^\circ} e_{bc} d\omega t + \int_{\alpha+210^\circ}^{\alpha+270^\circ} e_{ba} d\omega t + \int_{\alpha+270^\circ}^{360^\circ} e_{ca} d\omega t \right) = \frac{\sqrt{21} \cdot \sqrt{2}}{2\pi} E_{ab} \cos(\alpha + 10.89^\circ) = 1.03 E_{ab} \cos(\alpha + 10.89^\circ) \quad (3)$$

(2) 故障工况2:上下两臂、同相两晶闸管故障(以VT6和VT3为例)。

$$U_f = \frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\alpha+30^\circ} e_{ca} d\omega t + \int_{\alpha+90^\circ}^{180^\circ} e_{ac} d\omega t \right) = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} E_{ab} \cos(\alpha + 30^\circ) = 0.78 E_{ab} \cos(\alpha + 30^\circ) \quad (4)$$

(3) 故障工况3:上下两臂、不同相两晶闸管故障(以VT6和VT5为例)。

$$U_f = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\alpha+30^\circ} e_{ba} d\omega t + \int_{\alpha+90^\circ}^{\alpha+150^\circ} e_{ac} d\omega t + \int_{\alpha+150^\circ}^{\alpha+210^\circ} e_{bc} d\omega t + \int_{\alpha+210^\circ}^{360^\circ} e_{ba} d\omega t \right) = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{2\pi} E_{ab} \cos(\alpha + 30^\circ) = 0.78 E_{ab} \cos(\alpha + 30^\circ) \quad (5)$$

(4) 故障工况4:同臂两晶闸管故障(以VT6和VT4为例)。

$$U_f = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{\alpha+30^\circ}^{\alpha+150^\circ} e_{ac} d\omega t + \int_{\alpha+150^\circ}^{\alpha+270^\circ} e_{bc} d\omega t \right) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} E_{ab} \cos \alpha = 0.675 E_{ab} \cos \alpha \quad (6)$$

在公式推导过程中,要注意自然换相点是触发角为\$0^\circ\$的点,但不是线电压瞬时值初相位为\$0^\circ\$的点,否则会导致相角计算错误。并且,同种类型故障下,不同元件故障会造成励磁电压瞬时值相位的不同,但最终计算结果表达式是相同的,故式(3)~式(6)适用于该故障工况的所有情况。

以\$\alpha=45^\circ\$为例,对励磁电压平均值与控制触发角关系进行仿真验证如图5所示,仿真参数\$E_{ab}=173\$V。

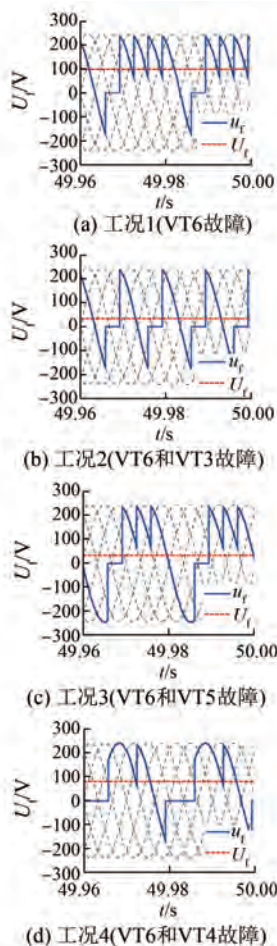
由图5可见,整流电路在上述晶闸管故障或其脉冲丢失时,正常工况下的六脉波产生了畸变。与关系式相比较,可验证结果一致。根据式(3)~式(6),利用平均值法判断故障类型。从图5中可以看出,最严重的是上下两臂各有一个晶闸管故障的两种情形。

4 故障情况解决措施

对于波形异常情况,有以下3种解决措施:

(1) 故障显示和记录:若配有在线实时监测系统,如触摸屏人机交互等,能够及时判断出故障元件/脉冲,人为采取措施。

(2) 故障预测、保护与定位:系统在发生故障

图5 不同故障工况下励磁电压仿真波形图 ($\alpha=45^\circ$)

前做出反应;在励磁无法调节使控制器正常运行时,继电保护动作;故障发生后,准确定位故障位置,以便及时排除故障。

(3) 励磁控制:励磁控制器通过励磁调节,改变触发时刻,减小触发角,进而提高励磁电压。

现针对措施(3),仍以 $\alpha=45^\circ$ 为例进行分析。由图 5(a)可以看出,对于故障工况 1,励磁电压平均值从原来的 165 V 下降为故障情况时的 100 V,变为 60%,势必对电能品质造成不小的损伤。由式(3)反解出新的触发角,此时 $\alpha=11.17^\circ$,以此触发角仿真,波形如图 6 所示,励磁电压和励磁电流已达到原水平。

通过仿真验证励磁功率单元故障工况下的带故障运行能力。图 7~图 9 分别给出故障工况 1 下, $\alpha=45^\circ$ 时晶闸管电压、电流仿真波形以及改变触发角后通过正常晶闸管和故障晶闸管的电流波形图。

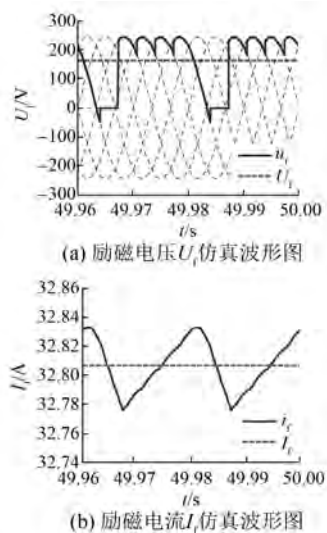
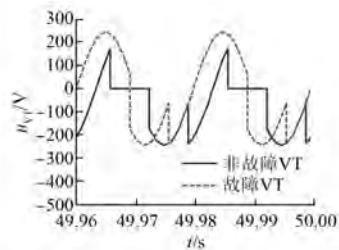
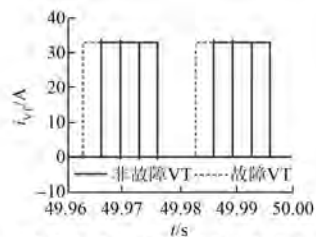
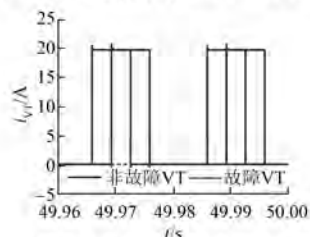


图6 故障工况 1 触发角改变后励磁电压电流仿真波形图

图7 故障工况 1 晶闸管电压 u_{VT} 仿真波形图

(a) 晶闸管电流仿真波形图 (正常工况)



(b) 晶闸管电流仿真波形图 (故障工况 I)

图8 故障工况 1 晶闸管电流仿真波形图 ($\alpha=45^\circ$)

由仿真结果三相桥式整流电路的特点可知,当处于晶闸管故障或脉冲丢失时的故障工况下,非故障晶闸管和故障晶闸管的正反相电压最大值和正常工况下没有差别,均为线电压幅值。流过

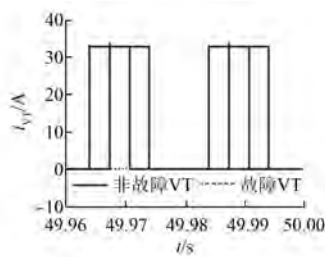


图9 故障工况1 触发角改变($\alpha=11.17^\circ$)晶闸管
电流仿真波形

非故障晶闸管的电流会有所下降,而通过改变触发角能使励磁电压达到正常情况水平,这时,流过非故障晶闸管电流也会恢复到原有水平。这正是三相桥式整流电路的优点,带故障晶闸管运行不会对非故障晶闸管造成损伤。

以上从理论和仿真上验证了措施(3)的可行性。但这种可行性是有条件的,比如在故障工况2和3下,无论怎样改变触发角,都无法达到想要的结果;而且,考虑换流等问题,移相范围一般为 $\alpha=10^\circ\sim160^\circ$,触发角不可能达到 0° 。各个情形的励磁电压最大值 $U_{f_max}(\alpha=10^\circ)$ 代入式(2)反解算出的控制触发角,就是可使用措施(3)的最小触发角 α_{min} 。若正常运行时触发角小于该角度,发生相应故障时,即使控制触发角为最小,也无法达到正常运行时的励磁电压。该最小触发角再同各个故障工况下整流电路处于励磁状态时的最大触发角 α_{max} 相比较,可计算出应用措施(3)触发角的移相范围。以故障工况1为例说明,将 $\alpha=10^\circ$ 代入式(3),得故障工况1下励磁电压最大值为 $0.962E_{ab}$,将该值代入式(2)反解出触发角为 44.55° ,而在故障工况1下处于励磁状态的触发角上限是式(3)为0的角度,即 79.11° 。这样可以得到各运行工况励磁状态下可使用措施(3)的触发角移相范围,如表1所示,即正常工况时,只有触发角在这一范围,故障时才可以采用措施(3)。

表1 各励磁状态下可使用措施(3)触发角移相范围

运行工况	U_{f_max}	α_{min}	α_{max}	α 移相范围
正常工况	$1.329E_{ab}$	10°	90°	—
故障工况1	$0.962E_{ab}$	44.55°	79.11°	$44.55^\circ\sim79.11^\circ$
故障工况2	$0.598E_{ab}$	63.71°	60°	不可使用
故障工况3	$0.598E_{ab}$	63.71°	60°	不可使用
故障工况4	$0.665E_{ab}$	60.49°	90°	$60.49^\circ\sim90^\circ$

由表1可以看出,故障工况2和故障工况3可使用措施(3)的最小触发角大于其在励磁状态能允许的最大触发角,所以只有故障工况1和故障工况4在其触发角范围内可以采用措施(3)。即便如此,晶闸管控制触发角移相范围大幅度缩小,不适于长时间运行和优良的控制。在实际中可以考虑3种措施相互配合。在脉冲丢失时,有利于备用励磁装置切换;晶闸管故障时,有利于调控发电机平稳退出运行而不至于导致振荡。

5 结 语

本文对励磁功率单元进行仿真研究,定性与定量分析其在脉冲丢失或晶闸管故障时波形规律,提出改变触发角维持机端电压恒定的应对措施及适用范围。结果表明,该方案在一定程度上能够维持发电机短期稳定运行,在脉冲丢失时为运行人员切换备用设备赢得时间,或在晶闸管发生故障后能够通过调控触发角以短期维持励磁电压,使发电机能平稳退出运行而不会产生稳定性问题。

到目前为止,自并励励磁系统和三相全控整流桥式电路在国内外各大型发电机组上有着广泛的应用。本文研究了三相全控桥式电路的故障分析、谐波和滤波分析、励磁功率单元和先进励磁控制和保护的配合与协调运作。

【参 考 文 献】

[1] 陆继明,毛承雄,范澍,等.同步发电机微机励磁控制[M].北京:中国电力出版社,2006.

[2] 李啸骢,徐俊华,谷立基,等.同步发电机多步预测校正励磁调节器[J].电力系统保护与控制,2011,39(17):120-125.

[3] 鹿建成,李啸骢,黄维,等.基于SSSC和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):21-27.

[4] 李啸骢,郑涛,梁志坚,等.微分代数模型可控制动电阻与励磁系统多指标非线性控制[J].电力系统保护与控制,2015,43(16):1-7.

[5] 刘甲林,傅磊.基于模糊PID双模控制的同步发电机励磁控制器仿真研究[J].电机与控制应用,2015,42(1):18-21.

[6] 傅磊,卢力东,刘甲林.一种发电机励磁系统性能的模糊综合评估算法[J].电机与控制应用,2016,43(2):26-29.

(下转第133页)

变化率作为伸缩因子的模糊控制器的输入,论域伸缩因子作为控制器的输出。通过改变桨距角模糊控制器输入输出论域的方式,避免了单一论域伸缩的反复调节,提高了控制器的控制精度。同时,采用风速模糊前馈的方法,提高了系统的响应速度,具有较好的控制性能。

【参考文献】

- [1] 戴媛媛,贾建芳,张吉宣,等.风力机变桨距控制策略研究[J].自动化仪表,2016,37(11): 20-24.
- [2] 付光杰,胡明哲.基于改进型学习率自适应 BP 神经网络的风力发电变桨距控制技术[J].自动化与仪器仪表,2016(6): 8-10.
- [3] 田勇,张宏立,玛依拉·赛依力.基于滑模变结构的风力机变桨距控制研究[J].华东电力,2011(9): 1438-1442.
- [4] WANG X, ZHU W L, SONG C. Chattering free sliding mode pitch control of PMSG wind turbine[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 6758-6763.
- [5] YU H Q, GAO Y, ZHANG H. Fuzzy self-adaptive PID control of the variable speed constant frequency variable-pitch wind turbine system[C] // 2014 IEEE International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Shanghai, 2014: 124-127.
- [6] LU W, GAO Y. Variable Universe Fuzzy Adaptive PID Control in the Digital Servo System[C] // 2016 8th International Conference on Intelligent Human - Machine Systems and Cybernetics (IHMSC),

Hangzhou, 2016: 204-207.

- [7] 郭鹏.模糊前馈与模糊 PID 结合的风力发电机组变桨距控制[J].中国电机工程学报,2010,30(8): 123-128.
- [8] 韦微,陈冉,陈家伟,等.基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J].中国电机工程学报,2011,31(17): 121-126.
- [9] 李洪兴,苗志宏,王加银.非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制[J].中国科学(E辑),2002,32(2): 211-223.
- [10] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学(E辑),1999,29(1): 32-42.
- [11] 李良峰.变论域模糊控制算法研究[D].成都:电子科技大学,2008.
- [12] ZHENG X L, LIU S, CHEN M J. Vertical movement control for variable vector propeller of submarine based on pitch angle varying[C] // 2015 34th Chinese Control Conference (CCC), Hangzhou, 2015: 171-176.
- [13] 韩兵,周腊吾,陈浩,等.基于变论域模糊控制的大型风电机组偏航系统[J].电工电能新技术,2016,35(8): 15-20.
- [14] 吴记群,魏万华,马慧霞.基于前馈和变论域模糊的联合装置温度控制[J].自动化与仪器仪表,2015(8): 103-105.
- [15] 任海鹏,郭鑫,杨彧,等.光伏阵列最大功率跟踪变论域模糊控制[J].电工技术学报,2013,28(8): 13-19.

收稿日期: 2017-06-20

(上接第 117 页)

- [7] 董久晨,王西田,刘明行,等.自并励静止励磁系统精细建模及仿真[J].电力自动化设备,2016,36(5): 112-117.
- [8] 孟凡刚,杨世彦,杨威.多脉波整流技术综述[J].电力自动化设备,2016,32(2): 9-22.
- [9] 杨冠城.电力系统自动装置原理[M].5版.北京:中国电力出版社,2012.
- [10] 姜建国,乔树通,郜登科.电力电子装置在电力系统中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(3): 2-6.
- [11] 郭荣祥,崔桂梅.电力电子应用技术[M].北京:高

等教育出版社,2013.

- [12] 王亮,王文策,程斌,等.基于 Simulink 的发电机励磁系统整流单元的建模与仿真[J].陕西电力,2011(7): 25-28.
- [13] 洪乃刚.电力电子、电机控制系统的建模与仿真[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [14] 樊俊,陈忠,涂光瑜.同步发电机半导体励磁原理及应用[M].2版.北京:水利电力出版社,1991.

收稿日期: 2017-06-20