

基于模糊滑模的SRG输出电压脉动抑制

针对开关磁阻发电机输出电压脉动的问题,在分析输出电压脉动的多种原因基础上,设计了模糊滑模控制器。传统滑模控制器具有快速收敛性,并存在抖振问题;加入模糊控制来选取合适的滑模增益,设计的模糊滑模控制器能结合传统的角度控制通过调整导通角来调节输出电压。该控制器相对经典的PID控制可以有效地缩短调节时间,减小了超调量和稳态误差,同时也解决了传统滑模控制存在的抖振问题。最后利用搭建的非线性模型进行仿真,验证了设计的控制器能有效地抑制电压脉动,提高了系统动态性能和电压品质。

夏 菲 夏宗泽 黄笑伯/国家电网辽阳供电局

0 引言

开关磁阻发电机(Switched Reluctance Generator, SRG)具有结构简单、耐高温以及高转速等优点,因此决定了其成为当今发展迅速的多电飞机(More Electric Aircraft, MEA)、全电飞机(All Electric Aircraft, AEA)中(如F-35)电源系统的首选对象。但是,SRG在工作状态下,尤其是在突加减负载或恶劣环境的干扰下存在输出电压脉动,因此,SRG电压脉动抑制问题是提高SRG发电品质的关键问题,也是SRG在航空领域推广与应用中亟待解决的技术难题。

目前,国内外学者对SRG输出电压脉动抑制的研究主要有:对SRG的主功率电路以及结构参数进行优化设计;基于电流分布函数的控制策略对引入智能控制算法设计反馈控制器进行优化。文献[1]通过设计电容滤波器和电压反馈调节器对输出电压进行优化控制,但并没有考虑一些恶劣条件对SRG输出电压的影响,而且功率电路的改变对于发电

机的更新推广势必会带来一定的工程难度。文献[2]针对线性SRG采用电流分布函数的方法来解决电压脉动,一定程度上忽略了其非线性特性。文献[3]采用内模PI控制,该方法可以抑制转速突变、负载扰动变化带来的输出电压脉动,但其只将输出电压和相电流作为反馈量,没有考虑其他变量对SRG性能的影响,一定程度上忽略了其的动态特性。

本文以飞机高压直流电源系统中的SRG为研究对象,分析了多种变量对SRG输出电压的影响。在其输出电压脉动分析的基础上,设计了滑模观测器,与传统的角度控制结合,通过调整导通角来对相电流进行补偿以达到对输出电压脉动的抑制;同时将模糊控制引入到滑模观测器中,其主要作用就是选择合适的滑模增益,使系统可以在滑模面附近滑动以控制滑模变结构存在的抖振问题。最后对搭建的启动/发电一体化非线性模型进行仿真试验验证,仿真结果表明,在负载建压、负载和转速变化的情况下,引入控制器的SRG仿真系统对外加扰动有较好的控制效果,并且减小了输出电压的稳态误差,同时提高了电压品质。

1 SRG电压脉动分析

SRG在自励发电模式建压阶段,由励磁电源 U_s 给系统提供初始励磁;当SRG发出电能给电容 C 充电使 U_c 达到需要的电压值时,就去掉外部附加电源,由系统自励发电。自励工作模式下的发电机系统重量小、效率高。但是,当用电



夏 菲/工程师

关键词/Keywords

开关磁阻发电机·
滑模控制器·
模糊控制·
电压脉动·

负载波动较大以及电容充放电时,会导致电路的不规则励磁电流控制较难,容易产生输出电压波动,对发电性能有一定影响,且对发电机本体有一定损害,缩短了发电机的寿命。

在忽略所有功率损耗的情况下,线性模型中的电压方程为

$$U = L \frac{di}{dt} + i\omega \frac{dL}{d\theta} + iR_s \quad (1)$$

式中, U 为输出电压; L 为相电感, ω 为发电机角速度; R_s 为相绕组电阻。

如果考虑功率损耗及绕组电阻等情况,则在非线性模型下励磁、发电阶段发电机绕组两端的电压为

$$U = \begin{cases} i_k R_s + \frac{d\psi_k(i_k, \theta)}{dt} & \theta_{on} < \theta < \theta_{off} \\ -i_k R_s - \frac{d\psi_k(i_k, \theta)}{dt} & \theta_{off} < \theta < 2\theta_{off} - \theta_{on} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i_k 为 k 相电流。

为了更加直观地分析输出电压波动的影响因素,可以推导出 ΔU 的公式。假设在发电状态其所有负载为 R , 电容两端电压为 U_C , 则在励磁过程中, 电容既给绕组励磁, 又给负载供电, 即

$$C \left(\frac{dU_C}{dt} \right) \omega = -i_R - i_C \quad (3)$$

在发电续流过程中, 通过绕组向电容充电, 电容向负载供电, 即

$$C \left(\frac{dU_C}{dt} \right) \omega = -i_R - i_z \quad (4)$$

式中, i_z 、 i_C 和 i_R 为电枢电流、电容电流和负载电流。

将式 (3)、式 (4) 联立可求得电容电压 U_C , 进而求得电容电压的变化量 ΔU_C , 而输出电压的变化量 $\Delta U = \Delta U_C$, 最终得到非线性模型下的输出电压变化量为

$$\Delta U = U_C(\theta_{on}) \left(e^{\frac{30\theta_{off}}{RC\pi n}} - e^{\frac{30\theta_{on}}{RC\pi n}} \right) - \frac{30P}{C\pi n} \quad (5)$$

式中, n 为发电机转速; U_C 为电容电压; R 为负载总电阻; P 为励磁阶段储能。

从推导的线性模型和非线性模型的电压方程以及 ΔU 的公式可以看出, 影响输出电压脉动的参

数包括电压 U_C 、转速 n 、负载 R 和电容 C 等。负载 R 、转速 n 随实际的工程应用变化, 且这些参数会在一些恶劣的航空条件下发生突变。这些参数的变化势必会引起电压的超调, 并产生电压脉动, 影响电压品质。

2 控制器的设计

2.1 设计思路

该控制器是将参考电压和实际反馈电压的差值作为输入变量, 同时将速度和电流反馈到控制器中。模糊滑模控制器可以检测到反馈状态变量的变化信号, 通过调整导通角来对电流环进行补偿以达到对输出电压的控制。也就是滑模控制器可以将输入量和反馈状态变量解算为角度信号, 与角度控制结合来调整导通角 θ_d ($\theta_d = \theta_{on} - \theta_{off}$)。当 $\Delta U = U_{ref} - U < 0$ 时, 需减小输出电压, 通过滑模控制器适当调整以增大导通角 θ_d ; 同理, 当 $\Delta U = U_{ref} - U > 0$ 时, 需增大输出电压, 通过滑模控制器适当调整以减小导通角 θ_d , 并利用模糊控制选取合适滑模增益保证系统在滑模面附近运动。其电压负反馈控制器结构如图1所示。

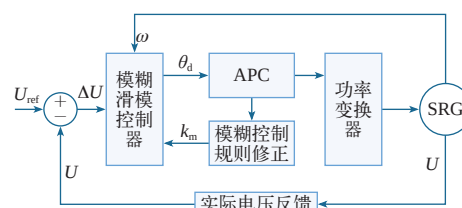


图1 SRG电压负反馈控制器结构

2.2 滑模控制器的建模

SRG工作状态的模型可以表示为

$$C \frac{dU}{dt} = -\frac{U}{R} + i \quad (6)$$

$$U = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega$$

式中, U 为输出电压; R 为负载总电阻; i 为输出电流; ω 为发电机角速度; C 为蓄电电容, 不计相绕组电阻。

为了设计滑模观测器, 先作如下定义

$$\begin{cases} x_1 = U_r - U \\ x_2 = -\dot{U} \end{cases} \quad (7)$$

式中, U 为发电机实际反馈电压; U_r 为给定电压。

将电压方程以状态空间的形式表述为

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a & -b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_r \\ \omega \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} a &= 1/CL \\ b &= 1/CR \\ c &= 1/CL \\ d &= -K/CL \end{aligned}$$

式中, $K = i \frac{dL}{d\theta}$ 。

选择积分滑模面为

$$s = \int_0^t \lambda x_2 + x_1 \quad (9)$$

式中, λ 为常数且大于零。

当系统到达滑模面时, 有 $s = \dot{s} = 0$, 即

$$s = \dot{s} = x_1 + \lambda x_2 \quad (10)$$

故 $x_2 = -x_1/\lambda$, 可得

$$x_1 = x_0 \exp(-t/\lambda) \quad (11)$$

式中, x_0 为 x_1 的初值; 常数 λ 决定系统的动态响应时间。

由滑模运动的可达性可知, 当系统运动到滑模面时, 需满足

$$s\dot{s} = s(\lambda x_2 + x_1) < 0 \quad (12)$$

对滑模控制系统的设计进行分析, 可取开关线为

$$H(s, \dot{s}): \dot{s} + \eta s = 0 \quad (13)$$

2.3 模糊滑模控制器的设计

控制器主要电路设计如图2所示。

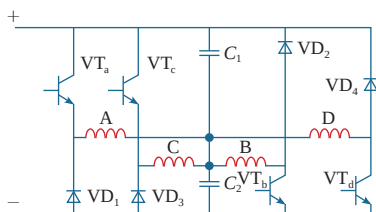


图2 控制器主要电路设计

为了使系统快速稳定地达到较高的要求, 控制器要求系统的滑动点趋近于滑模面时既要快速又要柔和。在滑模运动中, 若滑模增益选取过大, 系统就会快速到达滑模面, 但会存在较大的抖振; 若滑模增益选取过小, 系统到达滑模面的

速度就会变慢, 但相应的抖振也会减小。基于此, 控制律的控制就比较重要, 其一般是由切换控制 u_s (迫使系统的滑动点在滑模面上滑动) 和等效控制 u_e (使系统保持在滑模面上运动) 组成。而模糊控制的作用就是使系统的状态在等效控制和切换控制之间进行切换, 其模糊控制的思想为

$$u = \frac{\mu_{ZE}(s)u_e + \mu_{NZ}(s)(u_e + u_s)}{\mu_{ZE}(s) + \mu_{NZ}(s)} = u_e + \mu_{NZ}(s)u_s \quad (14)$$

$$\mu_{ZE}(s) + \mu_{NZ}(s) = 1$$

当隶属度函数 $\mu_{NZ}(s) = 1$ 时, $u = u_e + u_s$, 控制律就等效为传统的滑模控制; 当隶属度函数 $\mu_{NZ}(s) \neq 1$ 时, 控制律就等效为切换控制, 通过 $\mu_{NZ}(s)$ 的变化来调控系统在滑模面附近的运动以削弱抖振。

系统的等效控制律为

$$u_e = \frac{1}{C} \frac{x_1}{\lambda} \quad (15)$$

式中, C 为蓄电电容。

定义变量 $d_s = \frac{\dot{s} + \eta s}{\sqrt{1 + \eta^2}}$ 为滑动点和滑模面之间的距离。

由于系统受到各种干扰, 切换控制的控制律可以取为

$$u_s = k_m \text{sign}(d_s) \quad (16)$$

其中, 滑模增益 k_m 由设计的一维模糊控制器推理选择^[7], 解决了 k_m 选择过大或过小带来的矛盾。该模糊控制器以 d_s 为输入, 输入及输出变量的整数论域定为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 采用重心法解模糊化来输出一个常值 k_m 。具体的一维模糊规则如表1所示。

表1 模糊规则

d_s	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
k_m	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB

所以SRG调压控制系统的控制律设计为

$$u = u_e + u_s = \frac{1}{C} \left(\frac{x_1}{\lambda} \right) + k_m \text{sign}(d_s) \quad (17)$$

由Lyapunov定理分析可知, 能够找到相应的 k_m 使模糊滑模控制系统趋于稳定。

该模糊滑模控制器的模糊规则较少，处理速度较快，具有一定的工程实践意义。

3 仿真分析与验证

本文利用在Simulink中搭建的三相12/8非线性模型进行了仿真试验验证。参数如表2所示。

表2 发电机模型参数

参数	数值	参数	数值
定子极数	12	转子极数	8
定子极弧系数	0.5	转子极弧系数	0.355
定子外径/mm	120	转子外径/mm	69
定子内径/mm	69.8	转子内径/mm	30
气隙/mm	5.9	匝数	50
转动惯量/kg·m ²	0.001 3	功率/kW	2.2

3.1 负载和转速变化下的仿真试验

由式(5)分析可知，负载和转速是影响电压变化的两个主要外在因素，而且在一些特定的航空条件下很容易突变。所以，本文在设计的全状态反馈控制器启动/发电一体化非线性模型中分别仿真了负载突变和转速突变对输出电压的影响。图3为在0.2 s和0.4 s分别突减、突加50 Ω 额定负载时的输出电压和相电流的变化情况；图4为在0.2 s和0.4 s分别突减、突加2 000 r/min转速时的输出电压和相电流的变化情况。

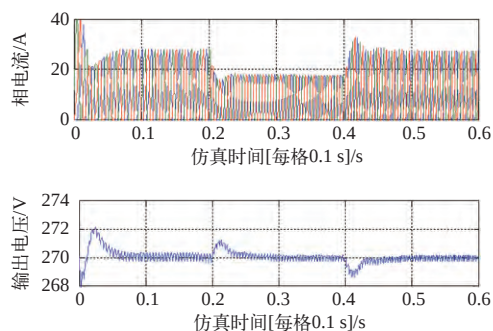


图3 负载变化下的输出电压与相电流

从图3可以看出，负载建压过程的超调在2 V左右；在0.2 s时突减负载，控制器通过调整增大导通角使相电流减小，电压增加的超调在1.3 V左右，经过0.06 s后达到稳定；同理，在0.4 s时突加负载，相电流增大，电压减小的超调在1.5 V左右，经过0.07 s后达到稳定。设计的控制器能较好地稳

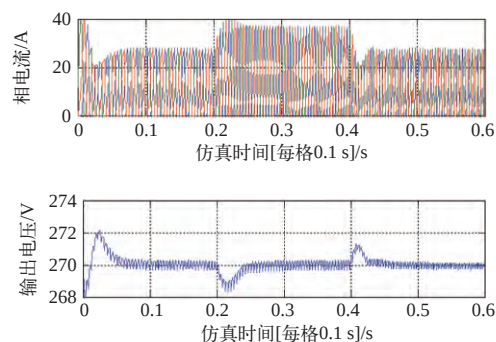


图4 转速变化下的输出电压与相电流

定突减、加负载时电压变化。

从图4可以看出，在0.2 s时突减转速，控制器通过调整减小导通角使相电流增大，电压减小的超调在1.8 V左右，经过0.08 s后达到稳定；同理，在0.4 s时突加转速，相电流减小，电压增加的超调在1.4 V左右，经过0.07 s后达到稳定。设计的控制器能较好地稳定突减、增转速时电压变化。

3.2 控制器的对比仿真试验

由于传统的PID控制在建压过程以及在突加、突减负载时超调量和调节时间等参数准确度不高，且模糊滑模控制器不存在二次超调的问题，表现出了良好的快速性和收敛性，因此能提高SRG控制系统的准确度。为了更好地观察设计的控制器抗干扰的效果，在突减、突加相同负载时将三种控制器的输出电压变化情况进行对比。负载PID控制、传统滑模控制和模糊滑模控制在负载变化下的输出电压和稳定后的电压波动范围曲线分别如图5~7所示。

三种控制器在建压过程和负载变化过程的控制参数的对比如表3所示。

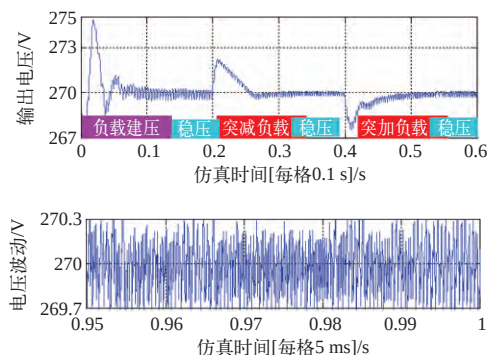


图5 PID控制下的输出电压和电压波动

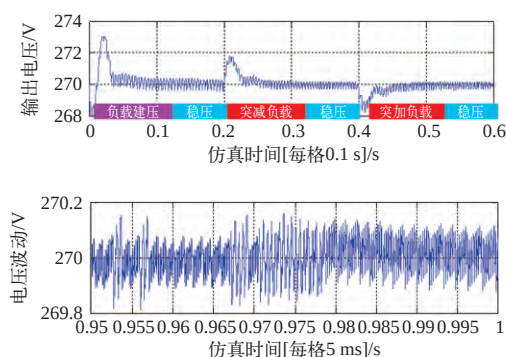


图6 传统滑模控制下的输出电压和电压波动

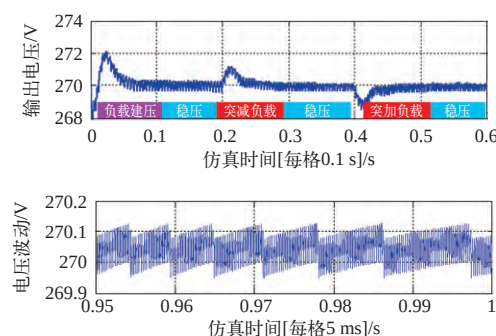


图7 模糊滑模控制下的输出电压和电压波动

表3 三种控制器的控制参数对比

三种控制器比较	建压过程			突减负载			突加负载		
	调节时间 t_r/s	超调值/V	超调量 $\sigma(\%)$	调节时间 t_r/s	超调值/V	超调量 $\sigma(\%)$	调节时间 t_r/s	超调值/V	超调量 $\sigma(\%)$
PID控制	0.15	5.0	1.85	0.12	2.3	0.852	0.14	2.5	0.926
传统滑模控制	0.11	2.9	1.074	0.10	1.8	0.667	0.10	1.9	0.704
模糊滑模控制	0.080	2.0	0.741	0.060	1.3	0.481	0.070	1.5	0.556

由图5可知，PID控制器下的输出电压在负载建压、负载变化过程中存在二次超调，调节时间相对较长；由图6可知，传统滑模控制器下的输出电压不存在二次超调，但在负载干扰下且趋近于额定电压时存在一定的抖动，变化不柔和；由图7可知，模糊滑模控制器下的输出电压不存在二次超调，且能在负载干扰下较平滑地趋近于额定电压，较好地稳定了输出电压。

为了更好地观察状态反馈控制器的控制效果，加长仿真时间，保留了0.95~1.0 s的输出电压局部放大波形。从图5可以看出，PID控制下的稳定输出电压波动范围基本保持在269.7~270.3 V之间，电压稳态误差范围为-0.3~0.3 V，电压变化不规律；从图6可以看出，传统滑模控制下的稳定输出电压波动范围基本保持在269.82~270.15 V之间，电压稳态误差范围为-0.18~0.15 V，输出电压过程中存在一定的抖动；从图7可以看出，模糊滑模控制下的稳定输出电压波动范围基本保持在269.93~270.13 V之间，电压稳态误差范围为-0.07~0.13 V，变化比较平稳，无瞬间剧烈变化，较好地稳定了输出电压，提高了电压品质。

4 结束语

本文主要分析了影响SRG输出电压的多种因素，提出了模糊滑模控制电压的策略，相比传统PID控制，解决了输出电压的二次超调、负载和转速变化时输出电压脉动较大的问题；同时，也较好地避免了传统滑模控制方式下存在的抖动问题，满足了快速性、稳定性和稳态误差小的要求，提高了输出电压品质。

参考文献

- [1] 彭寒梅, 易灵芝, 朱建林. 开关磁阻发电机输出电压脉动抑制的研究及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (5): 1237-1241.
- [2] Pan J F, Yu Zou, Cao Guangzhong. On the voltage ripple reduction control of the linear switched reluctance generator for wave energy utilization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (10): 5298-5307.
- [3] 咎小舒. 开关磁阻起动/发电系统控制策略及实验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.

(收稿日期: 2015-07-03) EA