

引用格式: 吴笃超. 外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性仿真分析[J]. 微电子学与计算机, 2023, 40(7): 82-88. [WU D C. Simulation analysis of gain robustness of generator excitation system under external multi-source interference[J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40(7): 82-88.] DOI: 10.19304/J.ISSN1000-7180.2022.0536

## 外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性仿真分析

吴笃超

(国家能源集团科学技术研究院有限公司, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 发电机励磁系统增益过程干扰因素较多,导致发电机励磁系统增益鲁棒性较差. 当前研究对外部干扰因素研究不足,增益控制效果较差. 为了提高发电机励磁系统增益控制的鲁棒性,设计一个外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性仿真方法. 引入不确定非线性分析过程,创新性利用 APSO 算法为待辨识干扰因子编码,修正异常数据;对含有不确定参数向量的非线性系统修正函数进行同步投影,计算多源干扰因子;建立包括同步发电机转子运动方程和转子运动稳定分析模型的发电机励磁系统数据模型;结合 schur 补偿定理和矩阵解耦求解稳定性矩阵,限制励磁电压控制量;采用 LPV 控制系统进行系统增益调度,设计输出反馈控制器;根据有功功率与电压之间的关系,设置系统的最优控制规律,实现外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性控制. 实验结果表明,在外部多源干扰下,所研究方法应用后,能够在 3 s 内使功角变化、转速响应、暂态电势响应值迅速恢复到正常,证明所研究方法具有较高的鲁棒性.

**关键词:** 外部多源干扰; 发电机励磁系统; 发电机励磁系统; 编码; 机械角; 误差函数

中图分类号: TM7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2023)07-0082-07

## Simulation analysis of gain robustness of generator excitation system under external multi-source interference

WU Duchao

(China Energy Science and Technology Research Institute Co., Ltd. Nanjing 210023, China)

**Abstract:** There are many interference factors in the gain process of generator excitation system, resulting in poor gain robustness of generator excitation system. The current research on external interference factors is insufficient, and the gain control effect is poor. In order to improve the robustness of gain control of generator excitation system, a simulation method of gain robustness of generator excitation system under external multiple source disturbances is designed. The uncertain nonlinear analysis process is introduced, and the APSO algorithm is innovatively used to code the interference factors to be identified and correct the abnormal data. The correction function of nonlinear system with uncertain parameter vector is projected synchronously, and the multi-source interference factor is calculated. The data model of generator excitation system including rotor motion equation and rotor motion stability analysis model of synchronous generator is established. Combining schur compensation theorem and matrix decoupling, the stability matrix is solved to limit the excitation voltage control quantity; LPV control system is used for system gain scheduling, and output feedback controller is designed. According to the relationship between active power and voltage, the optimal control law of the system is set to realize the gain robust control of the generator excitation system under external multi-source disturbances. The experimental results show that the power angle change, speed response and transient potential response can be restored to normal within 3 s after the application of the proposed method under external multi-source interference, which proves that the proposed method has high robustness.

**Key words:** external multi-source interference; generator excitation system; generator excitation system; code; mechanical angle; error function

## 1 引言

发电机的励磁控制是改善电力系统稳定性的重要措施之一,通过励磁控制,能够将发电机端电压保持在稳定水平内,使系统电压维持稳定,保证系统稳定运行.正因为励磁控制的这个特点,其发展还有理论都引起了人们的高度关注.但是电力系统具有强非线性、高维、高度耦合等特点,建立的线性模型较实际系统会存在较大偏差,从而导致控制效果不好.针对这个问题,有较多学者开展了相关问题的研究,其中,文献[1]中,杨淑英等研究了基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制方法,该方法预先进行不确定因素分析与补偿,通过补偿控制实现转矩控制回路之间的解耦,实现系统增益鲁棒性的控制;文献[2]中,霍承祥等研究了励磁系统动态增益对凸极发电机暂态稳定的影响分析方法,该方法预先对动态增益参数进行了转换,然后进行电机转矩机理的推导计算,实现增益稳定性控制与推导.文献[3]设计非线性励磁自适应控制器.利用高增益扰动观测器估计发电机的非线性、不确定性扰动因子;利用 ONAEC 对励磁测量发电机功角状态量,进行在线完全补偿;改进樽海鞘群算法求解最优控制参数,实现励磁增益控制.文献[4]设计了新能源场合下火电机励磁控制参数优化方法.分析风电并网引发的系统振荡特征;基于附加励磁控制设备,通过宽频滤波和动态增益调节优化控制参数,实现励磁增益控制.

上述研究方法虽然考虑系统稳定性以及系统性能在参数变化时的鲁棒性,但是并没有彻底从鲁棒控制的角度考虑问题,并且外部干扰因素较多,从而导致控制效果较差.针对当前所存在的问题,设计一个外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性仿真方法.创新性地 APSO 算法引入到干扰因子辨识中计算多源干扰因子;建立发电机励磁系统发电机转子运动方程与电磁转矩和功率计算方程;采用 schur 补偿定理求解系统状态稳定性矩阵;采用 LPV 控制系统进行系统增益调度,实现励磁系统增益鲁棒性控制.实验结果表明了本文方法的贡献在于能够在外部多源干扰下使励磁系统的功角变化、转速响应、暂态电势响应值迅速恢复正常,提高了系统

的鲁棒性,增强了系统的稳态效果.

## 2 多源干扰因子计算

发电机励磁系统的干扰原因有发电机误强励、电磁干扰、系统误操作误动作等,其中电磁干扰是电路传导和电场的形式传播为主,造成信号和模拟量的波动,扰动励磁系统正常运行.发电机的励磁控制系统中的谐振变换器在轻载高频段时运行时,频率无法调节电压增益,变压器副边绕组的电流谐波干扰会使驱动电压不稳定,而更高频率的开关电源会产生更大的电磁干扰.为最大程度抑制扰动,需要进行干扰因子分析<sup>[3]</sup>.而在实际工况中,被控制对象会受到各种各样的未知因素  $y$  的干扰,仅采用微分方程的形式进行建模是不可行的.基于上述分析,引入不确定非线性分析过程,将不确定非线性系统表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + f_1(x_1, x_2) + \varphi(x_1, x_2)\theta + w_1 \\ \dot{x}_3 = g(x_1, x_2, x_3)u + f_2(x_1, x_2, x_3) + w_2 \\ y = [q_1 x_1, q_2 x_2]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f_1$ 、 $f_2$  分别代表励磁系统状态向量,  $g$ 、 $\varphi$ 、 $\theta$  分别代表励磁系统状态输入增益变量、调节变量以及调节输出变量,即待辨识的参数,  $q_1$ 、 $q_2$  分别代表光滑函数,  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别代表不确定参数向量,  $w_1$ 、 $w_2$  分别代表光滑向量场.此时,可以同时计算三个不确定参数向量,并输出不确定非线性系数即干扰因子.

在此基础上,将 APSO 算法引入到干扰因子辨识过程中<sup>[4]</sup>,过程如图 1 所示.

通过上述过程进行待辨识参数编码,将待辨识参数表示为:

$$y(t) = f[u(t), \theta] \quad (2)$$

式中,  $f$  代表非线性函数,  $\theta$  代表待辨识的参数,例如励磁功率、励磁电压、励磁电流等物理量.

经过上述过程的参数辨识,对异常数据进行修正,修正函数如下所示:

$$Y_c(i) = v_i(i) \sqrt{\frac{Y_d(r-1)}{v_i(r-1)} \cdot \frac{Y_d(r+n+1)}{v_i(r+n+1)}}, \quad (3)$$

式中,  $v_i$  代表待测参数的特征值,  $r$  代表异常点,  $v_i(i)$  代表第  $i$  个指标的修正参数,  $Y_d$  代表平滑性参数.

在异常数据修正后,获得含有不确定参数向量的非线性系统修正函数投影同步结果,如下:

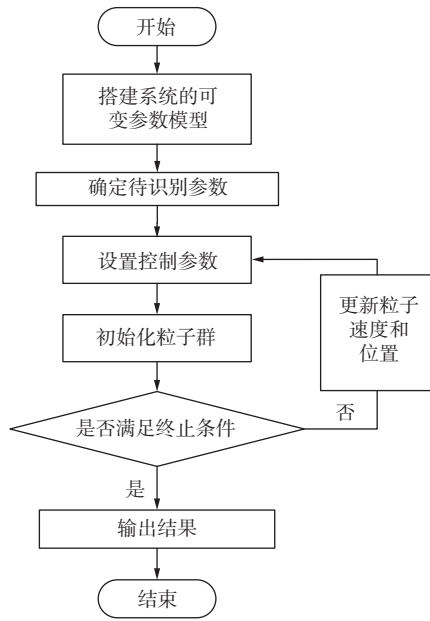


图1 干扰因子辨识过程

Fig. 1 Interactor identification process

$$E_i = \frac{|y_r - y_o|}{y_o} \quad (4)$$

式中,  $y_r$  代表修正后的值,  $y_o$  代表实际数据值。

通过多源干扰因子计算后,能够有效解决非线性环节难以辨识的问题,为后续计算提供参考。

### 3 发电机励磁系统数据模型建立

#### 3.1 同步发电机转子运动方程建立

基于上述过程计算进行干扰因子计算,在此基础上,建立系统模型。在发电机励磁系统中,各同步发电机转子之间相对角度变化情况是判断电力系统稳定性的重要指标之一<sup>[5]</sup>。无论干扰因子类别、持续时间以及干扰强度如何不同,对发电机励磁系统的影响最终都体现在转子稳定性上,因此转子运动方程是增益鲁棒性研究中的重要一步。不平衡转矩应满足<sup>[6]</sup>:

$$J \frac{dk\Theta}{dt} = T_m - T_e, \quad (5)$$

式中,  $J$  代表转子惯量,  $\Omega$  代表转子的角速度,  $\Theta$  代表转子相对于固定参考轴的机械角,  $T_m$  代表系统的机械转矩,  $T_e$  代表系统的励磁转矩,  $k$  代表标么值。

在此基础上,进行稳定分析<sup>[7]</sup>,假设发电机级对数为  $p$ ,则电机的极对数  $P$  与电角度的关系,即总电角度为:

$$\omega = p\Omega \quad (6)$$

式中,  $\omega$  是电角度,由于发电机励磁系统较为复杂,导致较难分析转子角相对角度的问题,为此在稳定分析

时<sup>[8]</sup>,同步发电机转子运动稳定分析模型表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = t\omega_0(T_{m^*} - T_{s^*}) \\ \frac{d\delta}{dt} = t\omega - \omega_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $T_{m^*}$  代表同步发电机组的机械转矩,  $T_{s^*}$  代表同步发电机组的励磁转矩,  $t$  为控制向量,  $\omega_0$  为初始电角度。

#### 3.2 发电机电磁转矩和功率计算

发电机电磁转矩的计算公式如下<sup>[9]</sup>:

$$M_E = i_q\psi_d - i_d\psi_q \quad (8)$$

式中,  $i_q$ 、 $i_d$  分别代表交、直流电流的实际值,根据转矩控制要求选择优化的可控变量  $\theta$ ,用于调节电机的直、交轴磁链,此时,不同转矩时对应的直轴电感和交轴电感不平衡转矩磁链为  $\psi_d$ 、 $\psi_q$ 。

将发电机送出的有功功率与电压之间的关系表示为<sup>[10]</sup>:

$$P_{E_q} = \frac{E_q U_s}{X_d + X_T + X_L} \sin\delta_{E_q}, \quad (9)$$

式中,  $\delta_{E_q}$  代表励磁电动势和电枢电流之间的相位差角,  $X_d$  代表励磁系统的电抗参数,  $X_T$ 、 $X_L$  分别代表变压器与线路的电抗值,  $E_q$ 、 $U_s$  分别代表励磁电动势以及无穷大母线电压值。

经过上述过程建立起发电机励磁系统数据模型,便于后续发电机励磁系统增益鲁棒性控制数据推导。

### 4 发电机励磁系统增益鲁棒性控制实现

在上述系统模型基础上,进行稳定性矩阵求解,采用 schur 补偿定理求解,首先将矩阵解耦的定义引入<sup>[11]</sup>,将求解矩阵记作  $A$ ,对其进行如下形式的分解:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

上述矩阵中,  $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{21}$ 、 $A_{22}$  均为方阵,在此基础上,进一步分解,公式如下:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A_{21}A_{11}^{-1} & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & A_{11}^{-1}A_{12} \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (11)$$

在此基础上,限制励磁电压控制量<sup>[12]</sup>,  $I$  为电枢电流恒定矩阵,在满足平方误差函数定积分极小值的同时使正定二次函数积分达到最小值  $J_k$ ,计算公式如下所示:

$$J_k = \int_b^{\infty} [\Xi(t) - X(t)]^T Q U^T(t) R U(t) dt, \quad (12)$$

式中,  $X(t)$ 、 $\Xi(t)$  分别代表控制向量  $t$  的二次函数,  $Q$  代表动态响应参数,  $U(t)$  代表非线性励磁系数,  $R$  代表滞回参数。

在对其控制时,假设非线性模型存在离散化形式,如下<sup>[13]</sup>:

$$Z(k+1) = F[Y(k), U(k)], \quad (13)$$

式中, $Z(k+1)$ 代表 $k+1$ 时刻输出的向量, $Y(k)$ 代表 $k$ 时刻输出的向量, $U(k)$ 代表 $k$ 时刻函数的离散参数, $F$ 代表系统阻尼。

在此基础上,进行增益调度,将 LPV 控制系统应用到调度中,其调节原理如图 2 所示。

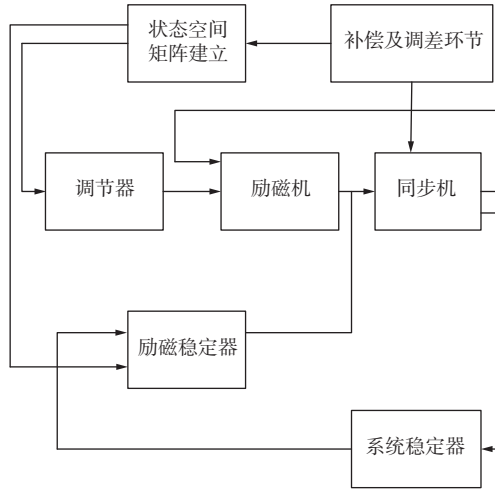


图 2 发电机励磁系统增益调节原理

Fig. 2 Gain regulation principle of the generator excitation system

基于上述过程可知,该系统主要是在原有状态空间矩阵基础上变换获得的<sup>[14]</sup>,对标带有约束的离散变量,将状态矩阵描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A[p(t)]x(t) + B[p(t)]u(t) \\ y(t) = C[p(t)]x(t) + D[p(t)]u(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $p(t)$ 代表系统中的参数变量, $x(t)$ 代表励磁系统状态变量, $u(t)$ 代表控制变量, $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  分别代表时变矩阵。

由于在调度过程中,变量估算是较为复杂的,所以会存在一定的误差,为避免这个情况的发生,进行输出反馈控制器设计<sup>[15-17]</sup>,将状态矩阵中的可调度参数设定为  $p \in R^n$ ,进一步将输出状态矩阵反馈控制表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A[p(t)]x(t) + B[p(t)]u(t) \\ y(t) = C[p(t)] \end{cases} \quad (15)$$

同时,考虑到干扰衰减过程中带来的稳定性问题,将准则方法引入,即当扰动量能量范围确定后,通过准则能够保证输出一个较为准确的范围,将准则约束问题定义为:

$$P = \frac{z}{d} \quad (16)$$

式中, $d$ 代表扰动量, $z$ 代表输出量。

完成增益调度,为进一步保证发电机励磁系统增益鲁棒性控制效果,基于并离散化得到其辨识等效数学模型,设置系统的最优控制规律:

$$J = [Y(k+1) - Y_r(k+1)]^T + R[U(k) - U^*] \quad (17)$$

式中, $Y_r$ 代表  $r$  时刻输出向量参考值。

通过上述求解,并离散化得到其辨识等效数学模型,判断其是否满足历史的有功功率与电压之间的关系,即可得到控制系统最优控制规律,以此避开当扰动量能量范围,减少外部多源干扰,完成发电机系统增益鲁棒性控制。

## 5 实验对比

### 5.1 实验目的及实验准备

此次实验的目的是验证外部干扰下发电机励磁系统增益鲁棒性分析方法在实际场景中的应用效果,并为了使实验结果更加具有对比性,将基于增益连续扩张状态观测器的控制方法(文献[1])与励磁系统动态增益影响分析方法(文献[2])对比。此次研究以某发电公司作为实验对象,该公司励磁系统为可控硅整流微机励磁系统,主要采用双微机数字式励磁协调器、两套自动电压调节器、三套功率柜以及电压保护柜等组成。主设备参数如表 1 所示。

表 1 发电机励磁系统主设备参数

Tab. 1 Main equipment parameters of the generator excitation system

序号	发电机指标	详细参数
1	型号	QFSN-300-2
2	额定有功功率	350 MVA
3	额定定子电压	20 KV
4	额定功率因数	0.86
5	额定励磁电流	2 500 A
6	额定励磁电压	302 V
7	额定空载励磁电流	985 A
8	额定空载励磁电压	113 V
9	额定转速	3 000 r/min

此次实验的主要过程如下所示:

第一,收集实验系统的电机参数、励磁方式等内容;

第二,现场测试,通过现场实验尽可能多地获取发电机励磁系统的实测数据;



第三,利用实测数据与三种方法计算出的数据进行对比.

在实验过程中,需要注意以下问题:

(1) 在实验方案设定完成后,需要有关实验以及操作人员熟悉实验方案;

(2) 在系统的运行方式以及机组运行工况满足要求后,才可以进行后续实验;

(3) 实验中如果出现异常,需要立即停止实验;

(4) 在实验之前确定发电机励磁系统是否工作正常;

(5) 每次实验之后,都应该立即进行实验录波检查,如果是不完好的则需要重复进行该项实验.

## 5.2 系统发生扰动后功角变化情况分析

对比三种方法控制后功角变化情况如图 3 所示.

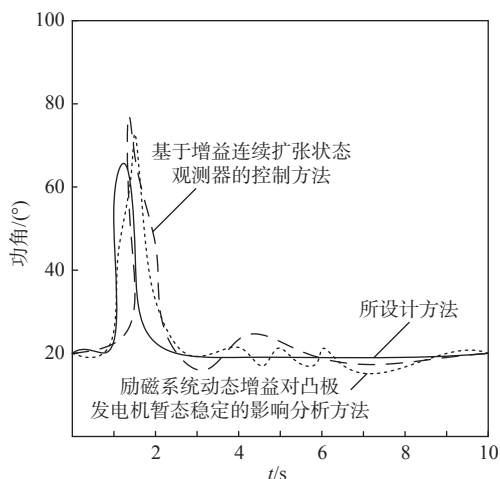


图 3 系统发生扰动后功角变化情况分析

Fig. 3 Analysis of work angle change after system perturbation

基于上述过程能够看出,在系统发生扰动后,所研究的发电机励磁系统增益鲁棒性控制方法控制后功角的状态变量偏离原始状态偏移量较小,并且能够在 2s 以内快速回到原始的运行状态. 说明经过所研究系统控制后,励磁系统增益鲁棒性较强,显著改善了系统的暂态响应性能. 其他两种方法虽能够进行状态变量调节,但是需要的时间较长,鲁棒性较差. 这是因为本文方利用 APSO 算法辨识干扰因子,为待辨识的干扰因子编码,提高了干扰因子辨识效率,有利于扰动后,快速计算始状态偏移量;采用 schur 补偿定理求解稳定性矩阵求解,适应不同的扰动状况,增加系统控制的鲁棒性.

## 5.3 系统扰动下转速响应曲线分析

在系统发生干扰后,系统转速会发生变化,为此对比三种方法控制后转速回归正常的情况如图 4 所示.

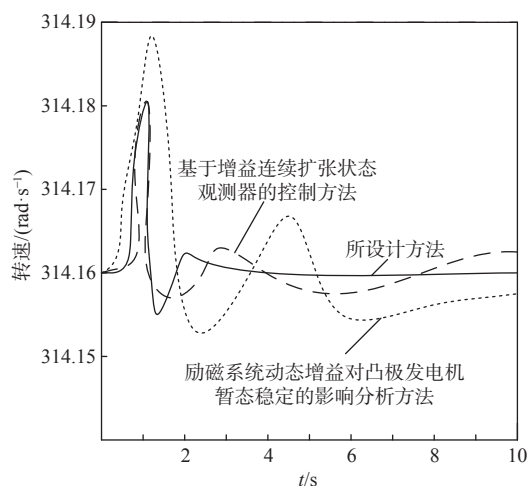


图 4 系统扰动下转速响应曲线分析

Fig. 4 Analysis of rotational speed response curve under system disturbance

基于图 4 能够发现,在系统发生扰动情况后,转速响应曲线发生突变,所研究方法能够 2 s 以内快速回归正常,并保持稳定,说明所提出方法不仅鲁棒性好,还具有较快的处理速度. 对比可知,其他两种方法较所研究方法鲁棒性差,在回归正常后也出现了波动情况. 这是因为本文充分考虑干扰因素的未知性和多样性,建立不确定非线性分析系统,分析出多种不确定非线性干扰因子,提高干扰因子控制效率;建立发电机励磁系统发电机转子运动方程与电磁转矩和功率计算方程,从根本上保证电力系统稳定性,让系统迅速回归正常. 设计反馈控制器,确定扰动量能量范围,引入 schur 补偿定理和准则方法减少外部多源干扰,保证最优控制,增强了系统的稳态效果.

## 5.4 实际应用分析

基于该公司励磁系统现场实测数据中的扰动发生时段数据,实际应用本文方法进行暂态电势控制的结果,如图 5 所示.

通过分析图 5 可知,系统数据显示该系统在 1 秒时出现干扰情况,但经过所研究方法控制后电势响应曲线能够在 3 s 内迅速回归正常,实际控制效果较好. 这是因为本文方法能够根据干扰因子分析结果,采用 schur 补偿定理求解系统状态稳定性矩阵,采用 LPV 控制系统进行系统增益快速调度,实现励磁系统增益鲁棒性控制,使暂态电势迅速恢复正常.

## 6 结束语

完成外部多源干扰下的发电机励磁系统增益鲁棒性仿真方法设计,能够在较短时间内就使系统回归

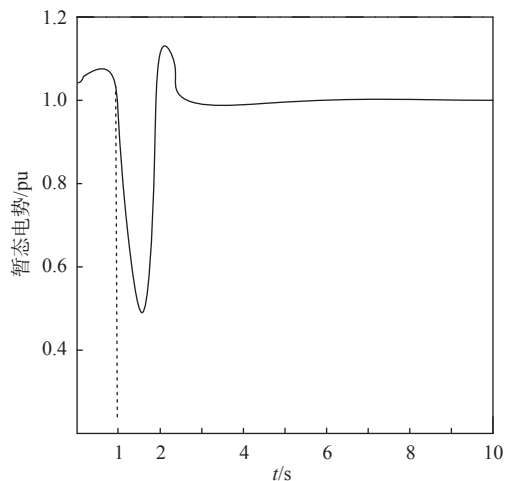


图5 暂态响应控制应用结果

Fig. 5 Application results of transient response control

正常操作,具有较好的鲁棒性。

但是影响发电机励磁系统的因素较多,在后续研究中还会出现更多的干扰因素,为此需要结合实际的情况做具体研究,进一步提高发电机励磁系统增益鲁棒性控制效果。

#### 参考文献:

- [1] 杨淑英, 王玉柱, 储昭晗, 等. 基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 1985-1996. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191226.  
YANG S Y, WANG Y Z, CHU Z H, et al. Current decoupling control of PMSM based on an extended state observer with continuous gains[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1985-1996. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191226.
- [2] 霍承祥, 高磊, 吴剑超, 等. 励磁系统动态增益对凸极发电机暂态稳定的影响[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 58-63. DOI: 10.7500/AEPS.20200401001.  
HUO C X, GAO L, WU J C, et al. Effect of dynamic gain of excitation system on transient stability of salient pole generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 58-63. DOI: 10.7500/AEPS.20200401001.
- [3] 荆立坤, 杨宁, 刘波, 等. 同步发电机最优非线性自适应励磁控制器设计[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(23): 115-123. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200046.  
JING L K, YANG N, LIU B, et al. Optimal nonlinear adaptive excitation controller design of a synchronous generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(23): 115-123. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200046.
- [4] 李秀琴, 石华栋, 李志鹏. 新能源场台下火电机组附加励磁控制参数优化设计[J]. *节能技术*, 2021, 39(6): 547-550. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2021.06.014.  
LI X Q, SHI H D, LI Z P. Optimization design of supplementary excitation damping control parameters for thermal power plant in the new energy access system[J]. *Energy Conservation Technology*, 2021, 39(6): 547-550. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2021.06.014.
- [5] 马燕峰, 郑力文, 霍亚欣, 等. 虚拟同步发电机接入电力系统的阻尼转矩分析[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(4): 166-171. DOI: 10.16081/j.epae.202003027.  
MA Y F, ZHENG L W, HUO Y X, et al. Damping torque analysis of virtual synchronous generator connected to power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(4): 166-171. DOI: 10.16081/j.epae.202003027.
- [6] 郭栋, 张波, 王巍, 等. 混合励磁同步电机的低速控制策略研究[J]. *控制工程*, 2019, 36(11): 2019-2024. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20180368.  
GUO D, ZHANG B, WANG W, et al. Research on low speed control strategy of hybrid excitation synchronous machines[J]. *Control Engineering of China*, 2019, 36(11): 2019-2024. DOI: 10.14107/j.cnki.kzgc.20180368.
- [7] 刘朋成, 项中明, 江全元, 等. 基于鲁棒容积卡尔曼滤波的同步发电机实时动态状态估计方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(8): 2860-2867. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0247.  
LIU P C, XIANG Z M, JIANG Q Y, et al. Real-time dynamic state estimation for synchronous machines based on robust CKF[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(8): 2860-2867. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0247.
- [8] 蓝益鹏, 任朝斌. 数控机床可控励磁直线同步电动机无速度传感器控制研究[J]. *机床与液压*, 2020, 48(15): 93-96. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.15.020.  
LAN Y P, REN C B. Research on speed sensorless control of controllable excitation linear synchronous motor for CNC machine[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(15): 93-96. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2020.15.020.
- [9] 刘竹娟, 肖岚, 贾宛英, 等. 基于滑模变结构控制的DSEM驱动系统研究[J]. *电力电子技术*, 2019, 53(4): 52-54.  
LIU Z J, XIAO L, JIA W Y, et al. Research on DSEM driving system based on sliding mode variable structure control[J]. *Power Electronics*, 2019,

- 53 (4) : 52-54.
- [10] 漆星, 张倩. Actor-Critic框架下的数据驱动异步电机离线参数辨识方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34 (9) : 1875-1885. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180273](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180273).
- QI X, ZHANG Q. Data-driven induction motor parameters offline identification method based on actor-critic framework[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34 (9) : 1875-1885. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180273](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180273).
- [11] 李生民, 张泽灵, 郭思语, 等. 混合励磁同步电机反馈线性化控制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34 (S1) : 39-51. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80039](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80039).
- LI S M, ZHANG Z L, GUO S Y, et al. Feedback linearization control of hybrid excitation synchronous motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34 (S1) : 39-51. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80039](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80039).
- [12] 王官宏, 李莹, 余耀, 等. 提高集中电源外送系统输电能力的发电机励磁系统协调优化[J]. *中国电力*, 2019, 52 (8) : 105-111. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201703090](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201703090).
- WANG G H, LI Y, YU Y, et al. Coordinated optimization of generator excitation system for improving transmission capacity of power system[J]. *Electric Power*, 2019, 52 (8) : 105-111. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.201703090](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.201703090).
- [13] 许永强, 田鹏. 基于优化BP神经网络的水轮发电机励磁系统研究[J]. *人民长江*, 2021, 52 (S1) : 328-331. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.077](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.077).
- XU Y Q, TIAN P. Study on excitation system of hydro-generator based on optimized BP neural network[J]. *Yangtze River*, 2021, 52 (S1) : 328-331. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.077](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.077).
- [14] 张志杰, 姚伟, 高磊, 等. 考虑发电机性能差异性的励磁顶值电压优化配置方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48 (12) : 41-49. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.190785](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.190785).
- ZHANG Z J, YAO W, GAO L, et al. Optimal configuration of excitation system ceiling voltage considering different performance of generators[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48 (12) : 41-49. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.190785](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.190785).
- [15] ARNAUD J, FERNANDES J F P, BRANCO P J C. Use of bulk superconductors in the excitation system of low-speed synchronous generators[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2021, 31 (5) : 5200606. DOI: [10.1109/TASC.2021.3054721](https://doi.org/10.1109/TASC.2021.3054721).
- [16] KESKES S, SALLEEM S, CHRIFI-ALAOUI L, et al. Nonlinear coordinated passivation control of single machine infinite bus power system with static var compensator[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9 (6) : 1557-1565. DOI: [10.35833/MPCE.2019.000173](https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000173).
- [17] MORSHED M J. A nonlinear coordinated approach to enhance the transient stability of wind energy-based power systems[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, 7 (4) : 1087-1097. DOI: [10.1109/JAS.2020.1003255](https://doi.org/10.1109/JAS.2020.1003255).

#### 作者简介:

吴笃超 男,(1985-),硕士,工程师.研究方向为发电机试验、励磁系统试验及电测量等.