立轴电动机的无阻尼非线性传动控制仿真研究

立轴电动机的无阻尼非线性电力传动控制系统是整个立轴电动机电气控制的核心，是保证立轴电动机稳定运行的关键。传统方法采用基于PID神经元自适应控制的无阻尼非线性电力传动控制系统，出现控制误差。为了提高立轴电动机的最大功率跟踪控制能力，减少因转动惯量耦合出现的输出误差，提出一种基于改进PID无差拍控制的立轴电动机电力传动控制模型，设计立轴电动机无阻尼非线性电力传动系统结构，分析立轴电动机的电磁力、电压及电流的关系，同时设计无阻尼非线性传动控制目标约束函数，使用转速控制逆变器对无阻尼非线性电力传动控制模型进行输出功率自适应调整，得到立轴电动机无阻尼非线性电力传动转子刷新时刻的无差拍控制输出。仿真结果表明，该方法进行立轴电动机的功率控制，控制误差为0.032%，而传统方法的误差达到2.45%，展示了较好的控制准确度，自进行电压控制过程中，控制系统能够在2 s内迅速跟踪到输入信号，同时不会出现控制误差，性能优于传统模型。

苏良昱／许昌学院电气工程学院

苏良昱／助教

关键词／Keywords
立轴电动机·
非线性·
传动控制·
仿真·

大型电气机组设备包括电动机和稳压设备等，对电气机组的稳压控制是保证电气系统稳定工作的关键。立轴电动机的重要种类广泛应用于工业、商业和民用各个领域，在经济社会发展和人民生活中具有十分重要的作用。立轴电动机可分为往复式立轴电动机和回转式立轴电动机；速度型立轴电动机又分为轴流式立轴电动机、离心式压立轴电动机和混流式立轴电动机。无论是哪种电动机组，机组设备规模都较为庞大，在较为复杂的运行过程中，各种故障信号、噪声信号和电压信号均呈现较强的非线性，机组设备中存在来自于发电系统、输电系统和配电系统的干扰，电动机传动系统采用变频变压调速系统设计的方式，并通过直流传动和变频传动对电动机组进行传动控制，保证电动机的稳定高效运行。可见，立轴电动机的无阻尼非线性电力传动控制系统是整个立轴电动机电气控制的核心，也是保证立轴电动机稳定运行的关键。因此研究立轴电动机的传动控制模型具有重要的意义[1]。

传统方法中，立轴电动机的无阻尼非线性电力传动的控制主要有PID神经元自适应控制、基于虚拟样机技术的电力传动控制以及基于模糊控制理论的电力传动控制等。其中，以PID神经元自适应控制的电力传动控制系统最为常见，通过建立PID神经元自适应控制方案建立模糊控制律，当电动机传动控制电压骤升时，输出功率出现差拍谐振，性能不好[2-4]。文献[5]提出一种基于静止无功率补偿器的非线性控制设计的立轴电动机无阻尼非线性电力传动控制模型，进行直线反馈线性化超导转动惯量设计，实现对无阻尼非线性电力传动控制系统的无阻尼非线性控制，然而，该控制方法存在控制准确度不高的问题，不适应于立轴电动机这种干扰性和非线性较强的电动机控制。文献[6]提出一种基于广域参数分布的反馈控制系统，对影响系统参量的所有参数建立关联矩阵，计算最小反馈误差，实现反馈控制，但算法复杂度高；T. Tusar、P. Korosec和G. Papa等人使用分析模型进行优化设计，同时

许昌学院2015年度科研基金项目（2015073），2015年许昌市科技发展计划项目（1502093）。

中国知网 https://www.cnki.net

使用有限元对结果进行验证。文献[7] 提出一种简单的分析设计方法，用以设计小型的两极立轴电动机控制系统，取得了较好的效果，但进行多目标控制设计时，以电动机重量、温升作为约束条件存在控制误差。分析可见，传统方法采用基于PID神经元自适应控制的无阻尼非线性电力传动控制系统，会出现控制误差[8-9]。

为了提高立轴电动机的最大功率跟踪控制能力，减少因转动惯量耦合出现的输出误差，本文提出一种基于改进PID无差拍控制的立轴电动机电力传动控制模型，首先构建立轴电动机的系统结构模型，分析立轴电动机的电磁力、电压及电流的关系，设计无阻尼非线性传动控制目标约束函数，实现控制算法改进，最后通过仿真实验进行性能验证，展示了本文算法的优越性。

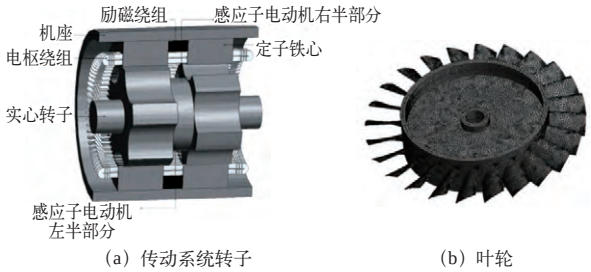
无阻尼非线性电力传动系统结构设计与控制性能分析

1. 立轴电动机无阻尼非线性电力传动系统的组成结构模型

在分析立轴电动机无阻尼非线性电力传动控制模型和控制算法设计之前，首先给出立轴电动机无阻尼非线性电力传动系统的结构和组成，用以指导无阻尼非线性电力传动控制算法的设计。立轴电动机的无阻尼非线性电力传动系统主要由电动机、中频发电机、拖动电动机、超导转子整流器、直流变换器和系统终端设备组成，立轴电动机的叶轮在运行中选择SIMPLEC速度与压力耦合方式，动叶片固定安装在轮毂上，通过无阻尼非线性电力传动、气流压力将使叶片产生弯曲应力，传动系统的转子和立轴电动机实现关联耦合。无阻尼非线性电力传动系统的转子和立轴电动机叶轮耦合示意图如图1所示。

立轴电动机的传动系统模型如图2所示。图2中，依据洛伦兹法则，长度为l的导体，在磁场密度为B的磁场中通过电流I时，导体所受的力为$f=IlB$；k_f为绕组槽满率；A_w为绕组截面积，定义为$A_w=\pi l_w(2r_r+2l_g+l_w)$。

发电机的电能驱动电动机旋转，提供给系统



（a）传动系统转子　　（b）叶轮

图1　无阻尼非线性电力传动系统的转子和立轴电动机叶轮耦合示意图

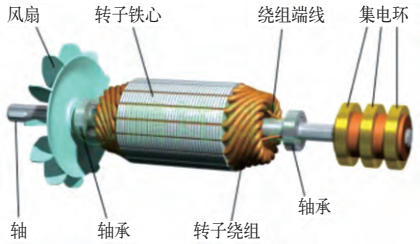


图2　立轴电动机传统系统模型

中的各种控制器、电枢反应和定/转子铁心磁阻，绕组表面处的磁通密度为

$$B_g=\frac{F_m}{A_g\Re} \tag{1}$$

式中，F_m为每极磁动势；A_g为绕组气隙面积；$\Re$为绕组。

在机组供电过程中，随着实际电流矢量$\boldsymbol{i}_s$的波动变化，无阻尼非线性电力传动系统产生的电压为

$$F_m=\frac{B_r l_m}{\mu_0\mu_{r1}} \tag{2}$$

$$A_g=l_s\frac{\beta\pi}{p}(r_r+l_g) \tag{3}$$

$$\Re=\frac{p}{\mu_0 l_s\beta\pi}\left(\frac{1}{\mu_{r1}}\int_{r_r-l_m}^{r_r}\frac{d_r}{r}+\int_{r_r}^{r_r+l_g}\frac{d_r}{r}+\frac{1}{\mu_{r2}}\int_{r_r+l_g}^{r_r+l_g+l_w}\frac{d_r}{r}\right) \tag{4}$$

在此，长度为l的导体在磁场B中以速度v运动，则产生的电压$E=vlB$，磁导率$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m，μ_{r1}和μ_{r2}为永磁体和绕组的磁导率。定/转子轴向长度μ_{r1}和μ_{r2}为1，则

$$B_g=\frac{B_r l_m}{(r_r+l_g)\ln\left(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m}\right)} \tag{5}$$

由此，考虑到漏磁系数k_1和实际绕组在极下的

中国知网 https://www.cnki.net

跨距系数k_β，在大多数设计中目标函数包含了带权重系数的总损耗，得到立轴电动机传统控制的转矩可以表示为

$$T_{em}=\frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}}{\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})} \tag{6}$$

$$k_1=1-\frac{1}{\left[0.9\times\frac{r_r}{\beta p(l_g+l_w)}\right]^2+1} \tag{7}$$

由控制系统决定的修正系数，表示在某一状态下实际运行的绕组与总绕组之比（比如$k_c=2/3$），由此得到了立轴电动机无阻尼非线性电力传动系统的组成结构模型，为进行传统控制设计提供了前提。

2. **电动机传动控制目标约束函数**

在上述结构模型设计的基础上，分析立轴电动机的电磁力、电压及电流的关系，设计无阻尼非线性传动控制目标约束函数，假设立轴电动机无阻尼非线性电力传动控制系统的发电机带整流谐振角为ω_0，电流有效值为I_r，无阻尼非线性电力传动系统发电机带整流容性电流有效值为I_o，通过上述分析，可以计算得到

$$\begin{aligned} I_s&=\frac{\omega_0 M_{ps} I_p}{R_s+Z_{sr}}\\ I_r&=\frac{\omega_0^2 M_{ps} I_p}{R_s+Z_{rl}}\\ I_o&=\frac{M_{rl} I_r}{L_o}\end{aligned} \tag{8}$$

进一步分析，得到无阻尼非线性电力传动系统中的三相电压平衡状态方程为

$$u=u_{eq}+u_0=h_n(\varphi_a,\dot{\varphi}_a)+M_n\ddot{\varphi}_{ad}-M_n ce_2-\operatorname{sgn}(M_n)\bar{\rho}(t)\operatorname{sgn}(s) \tag{9}$$

在立轴电动机无阻尼非线性电力传动控制中，需要进行换流设计，换流过程无阻尼非线性电力传动同步控制的反射阻抗Z_{rl}、Z_{sr}和Z_{ps}可以通过下式计算得出

$$\begin{aligned} Z_{rl}&=\frac{M_{rl}R_o}{L_l^2}\\ Z_{sr}&=\frac{\omega_0^2 M_{sr}^2}{\frac{M_{rl}R_o}{L_l^2}+R_r}\\ Z_{ps}&=\frac{\omega_0^2 M_{ps}^2}{Z_{sr}}\end{aligned} \tag{10}$$

考虑直流参考电压u_{dc}和立轴电动机无阻尼非线性电力传动直流侧能量e_u，通过Neumann方法可以得到互感值，其中$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$，无阻尼非线性电力传动系统耦合系数$k=M/\sqrt{L_{11}L_{22}}$。电动机传统控制电流可以表示为$I=A_cJ_{cu}$，因此端电压为$V=E+RI$，其中R为绕组电阻。因此

$$V=\frac{l_s k_f k_c A_w}{A_c}\left[\rho k_{et}J_{cu}+\frac{k_\beta k_1 B_r \omega_r}{\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})}\right] \tag{11}$$

式中，ρ为导线电阻率；$k_{et}=1+\pi\gamma(r_r+l_g+l_w)/(pl_s)$。通过上述处理，在电压和电流之间折中选取功率$P=VI$，设计无阻尼非线性传动控制目标约束函数，考虑到磁损耗，电磁转矩表示为

$$T_{em}=\frac{\pi k_f k_c k_1 k_\beta B_r l_m l_s l_w (2r_r+2l_g+l_w)J_{cu}}{\ln(\frac{r_r+l_g+l_w}{r_r-l_m})}-(\frac{P_e+P_h}{\omega_r}) \tag{12}$$

输出转矩为

$$T_{out}=T_{em}-\frac{P_w+P_b}{\omega_r} \tag{13}$$

那么立轴电动机的无阻尼非线性传动控制的目标函数定义为

$$\begin{aligned} f_0(X)=&w_p P_1(X)+w_v V_t(X)+w_c C(X)+\\ &\frac{1}{\varepsilon}\left[f_u(1-\frac{T_{em}}{T_{em}^*})+f_u(1-\frac{\omega_r^{max}}{\omega_r^*})+f_u(\frac{B_{sy}}{B_{sy}^{knee}}-1)\right]\end{aligned} \tag{14}$$

分析其控制性能，在立轴电动机无阻尼非线性电力传动运行过程中，受外电场环境影响呈现一种时变非线性特征，需要进行控制算法改进。

电力无阻尼非线性传动控制改进设计

为了提高立轴电动机的最大功率跟踪控制能力，减少因转动惯量耦合出现的输出误差，提出一种基于改进PID无差拍控制的立轴电动机电力传动控制模型，选取SPIDNN作为学习网络，控制

中国知网 https://www.cnki.net

神经网络模型如图3所示，设计三层前向神经元网络，即2×3×1结构，其输入层有两个神经元。

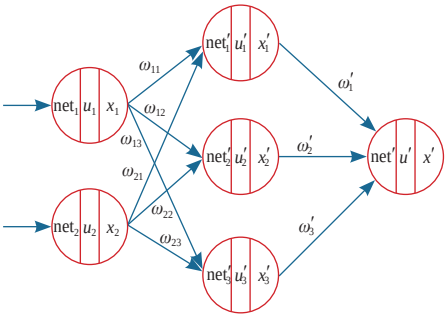


图3 电动机传动控制神经网络模型

图3中，设置迟滞控制算子，采用自适应算法在线调整权值，总输入net$_j$等于与其相连的各支路输出量（x_1，x_2，…，x_n）分别乘上权重值（w_{1j}，w_{2j}，…，w_{nj}）后的总和，无阻尼非线性电力传动无差拍控制系统的输出功率增益最大化结果为

$$V=\frac{1}{2}s^2+\frac{1}{2}\eta^{-1}\tilde{\omega}^{\mathrm{T}}\tilde{\omega} \tag{15}$$

磁链控制方程为

$$W(n+1)=W(n)-\eta\frac{\partial E}{\partial W}+\partial\Delta W(n) \tag{16}$$

结合使用转速控制逆变器对无阻尼非线性电力传动控制模型进行输出功率自适应调整，得到立轴电动机的转速控制器使用零阶保持器设计传递函数，即

$$w'_{\mathrm{sjh}}(n_0+1)=w'(n_0)-\eta'_{\mathrm{sjh}}\frac{\partial J}{\partial w'_{\mathrm{sjh}}} \tag{17}$$

式中，$w'(n_0)$为n_0时刻采样电流；η'为系统滞后拍SPIDNN模糊控制系数。

设计自适应律，以消除参数估计对系统稳定性的影响，选择第三个李雅普洛夫函数为

$$V_3=V_2+\frac{\lambda_1\xi_1^2}{2}+\frac{\lambda_2\xi_2^2}{2}+\frac{\tilde{\delta}^2}{2\varepsilon_1\delta} \tag{18}$$

通过求导有

$$\dot{V}_3=\dot{V}_2+\lambda_1\xi_1e_1+\lambda_2\xi_2e_2-\frac{\tilde{\delta}\hat{\dot{\delta}}}{\varepsilon_1\delta} \tag{19}$$

在无阻尼非线性电力传动系统发电机相电压一定的前提下，固定输入层至隐含层的权值ω_{ij}(i=1,2；j=1,2,3)，仅调节隐含层至输出层的权值ω'_j(j=1,2,3)，将网络的输入设定为$x=[\varphi_a\ \ \dot{\varphi}_a]$，最后得到立轴电动机无阻尼非线性电力传动转子刷新时刻的无差拍控制输出为

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}&=\frac{w_\infty(V)-w}{\tau_{\mathrm{M}}(V)}\\ w_\infty(V)&=\frac{1}{1+\mathrm{e}^{-0.1(V+35)}}\\ \tau_{\mathrm{M}}(V)&=\frac{400}{3.3\mathrm{e}^{0.05(V+35)}+\mathrm{e}^{-0.05(V+35)}}\end{aligned} \tag{20}$$

式中，V为立轴电动机的传动控制电压；E为SPIDNN控制器的输出比例因子。

通过上述处理实现算法改进，减小控制误差。

仿真实验与结果分析

为了验证本文算法在实现立轴电动机无阻尼非线性传动控制中的性能，最后进行一次仿真实验。仿真建立在Matlab Simulink软件基础上，设计控制参数如下：$N_{\mathrm{p}}=N_{\mathrm{s}}=20$，$f=20.5$ kHz，$C_{\mathrm{p}}=C_{\mathrm{s}}=0.57$ μF。立轴电动机的无阻尼非线性电力传动系统中，使用了12 V、7.2 A·h的蓄电池作为主供电系统，再通过两个DC－DC电源转换模块分别将12 V电压转换为5 V和±15 V电源，对额定电压、额定功率和电动机转速进行动态设置，并对所有参数进行标准化处理，立轴电动机无阻尼非线性电力传动系统的电力传动控制电路转子模型线圈距离100 mm，输入电压24 V。立轴电动机的无阻尼非线性电力传动系统定子电阻$R_{\mathrm{s}}=0.734\ 8$ Ω，转子电阻$R_{\mathrm{r}}=0.740\ 2$ Ω。立轴电动机的主要控制参数设计如下表所示。

表 立轴电动机传动控制主要参数

立轴电动机参数	数值
传动惯量/kg·m^2	0.256
最大光能利用率	0.28
额定功率/kW	34
电动机传动轮直径/m	3.0
主动轮转速比	2.4
额定电压/V	380

在上述仿真环境和参数设定的基础上，进行电动机的无阻尼非线性传动控制仿真，首先进行

中国知网 https://www.cnki.net

电动机的传动功率控制，得到控制系统的输出结果如图4所示。从图4可见，采用本文算法进行立轴电动机的功率控制，具有较好的曲线跟踪性能，控制误差为0.032%，而传统方法的误差达到2.45%，展示了较好的控制准确度。

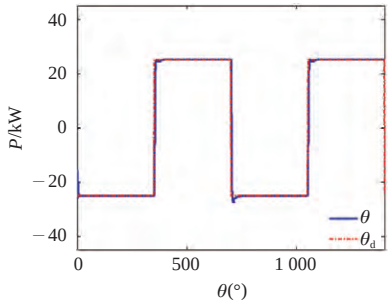


图4 立轴电动机的功率控制输出结果

进一步进行立轴电动机的无阻尼非线性传动电压控制仿真，得到输出结果如图5所示。由图5可见，控制系统能够在2 s内迅速跟踪到输入信号，同时不会出现控制误差。

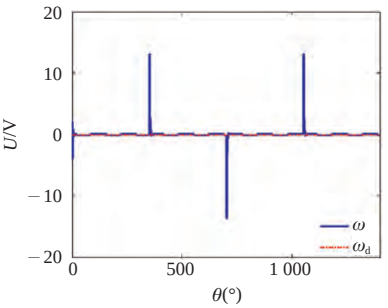


图5 电动机传动电压控制准确度仿真

结束语

立轴电动机的无阻尼非线性电力传动控制系统是整个立轴电动机电气控制的核心，也是保证立轴电动机稳定运行的关键。传统方法采用基于PID神经元自适应控制的无阻尼非线性电力传动控制系统，出现控制误差。为了提高立轴电动机的最大功率跟踪控制能力，减少因转动惯量耦合出现的输出误差，对此本文提出一种基于改进PID无差拍控制的立轴电动机电力传动控制模型，首先构建立轴电动机的系统结构模型，分析立轴电动机的电磁力、电压及电流的关系，设计无阻尼非线性传动控制目标约束函数，实现控制算法改进，研究结果表明，采用本文算法进行立轴电动机的功率控制，控制误差为0.032%，而传统方法的误差达到2.45%，展示了较好的控制准确度。进行电压控制过程中，控制系统能够在2 s内迅速跟踪到输入信号，同时不会出现控制误差，性能优于传统模型。

参考文献

[1] 雷邦军，费树岷，翟军勇．静止无功补偿器（SVC）的一种新型非线鲁棒自适应控制设计方法 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (30)：65-70．

[2] 张小冰．变频器优化控制方法研究与仿真 [J]．计算机仿真，2011，28 (11)：409-412．

[3] 方支剑，段善旭，陈天锦，等．储能逆变器预测控制误差形成机理及其抑制策略 [J]．中国电机工程学报，2013，33 (30)：1-8．

[4] Holtz J．Pulsewidth modulation for electronic power converters [J]．Proceedings of the IEEE，1994，82 (8)：1194-1214．

[5] 齐昕，周晓敏，马祥华，等．感应电机预测控制改进算法 [J]．电机与控制学报，2013，17 (3)：62-69．

[6] 曹玉丽，史仪凯，袁小庆，等．自平衡机器人变论域模糊 PID 控制研究 [J]．计算机仿真，2013，30 (2)：347-350．

[7] Hwang C C，Chang J J．Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor [J]．Journal of Magnetism and Magnetic Materials，2000，20 (9)：234-236．

[8] Markovic M，Perriard Y．Simplified design methodology for a slotless brushless DC motor [J]．IEEE Transactions on Magnetics，2006，42 (12)：3842-3846．

[9] 李鹏，孙未蒙，李文强，等．一种改进积分滑模面在飞控中的应用 [J]．控制工程，2010，17 (3)：269-289．

（收稿日期：2015－02－10）EA

中国知网 https://www.cnki.net