

# 飞轮储能装置在风电场功率平滑控制中的策略优化

黄煜, 袁宇浩, 张广明

(南京工业大学 自动化与电气工程学院, 南京 211816)

**摘要:** 风速的不稳定性和间歇性使得风力发电机的输出功率具有随机性和波动性, 大规模风电并网往往会对电力系统的稳定运行带来严重的影响; 飞轮储能由于其快速的脉冲响应和高充放电率, 能够有效减小风机系统接入电网时的功率波动; 文章对采用永磁同步电机的飞轮储能系统在抑制风电系统有功功率波动的应用中的控制策略进行了优化设计; 采用模糊推理的方法实现对有功功率平滑值的优化计算, 结合永磁同步电动机 (PMSM) 数学模型, 提出基于改进 PR 控制器及转子磁链定向的矢量控制策略; 最后, 通过 Matlab/Simulink 进行仿真, 仿真结果显示了文中的策略具有较好的动态特性和鲁棒性。

**关键词:** 飞轮储能; 模糊推理; 功率调节; 永磁同步电机; 改进 PR 控制器

## Optimization of Power Smoothing Control Strategy for Wind Farm Based on Flywheel Energy Storage Device

Huang Yu, Yuan Yuhao, Zhang Guangming

(Automation and Electrical Engineering Institute, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** The instability and intermittent of wind speed makes the output power of the wind turbine randomness and volatility. Due to its fast pulse response and high charge-discharge rate, the flywheel energy storage can effectively reduce the power fluctuations caused by the fan system when connected to the grid. This article optimized the control strategy of permanent magnet synchronous motor based flywheel energy storage system to reduce the active power fluctuations caused by the wind power system. Fuzzy inference method is used to calculate the smoothing active power value, and the improved PR controller and rotor flux oriented vector control strategy is proposed based on the mathematical model of the permanent magnet synchronous motor (PMSM).

**Keywords:** flywheel energy storage; fuzzy inference; power adjustment; permanent magnet synchronous motor; improved PR controller

### 0 引言

由于风速具有不可准确预期、随机波动和不可控制等特性, 间歇的风能作用于风电机组后所得到的输出有功功率将随风速的变化而波动。功率波动将对电网的电压和频率产生显著影响, 产生系统电压波动、谐波及闪变等一系列电能质量问题。因此输出有功功率平滑控制是风电机组的关键技术之一。

飞轮储能储能密度高, 生命周期长, 对环境友好。其具有快速脉冲响应能力和高充放电率的特点, 在合理的控制策略下, 很适用于瞬时平滑风电场的输出功率。利用飞轮储能系统进行有功功率平滑调节存在以下两个问题: (1) 系统向电网输出的有功功率的计算方法; (2) 飞轮储能系统中飞轮电机的功率控制策略。对于系统向电网输出的有功功率期望值的计算方法, 目前有以下几种处理方式: 文献 [1] 以平均风速下风机

能捕获的最大风能设为系统期望输出功率; 但这种方法都仅将期望输出功率单纯与风机组输出功率相联系, 而没有考虑到飞轮的转速限制对期望输出功率的影响。文献 [2-3] 采用模糊推理的方法来确定系统的期望输出功率, 将飞轮的转速纳入模糊推理的输入变量, 得到的期望输出功率更为精确。对于飞轮电机控制策略的选择, 则往往取决于电机的种类和控制的目标。文献 [4] 针对采用感应电机的飞轮系统, 比较了直接转矩控制策略和矢量控制策略的优劣。文献 [5] 针对异步电机无传感器矢量控制系统, 提出了一种新型的控制策略, 可在出现负载波动或输入功率波动时维持风电机组直流侧电压的稳定。

本文在处理系统向电网输出的有功功率的计算时, 参考了文献 [3] 中提出的模糊推理的方法, 优化了模糊规则表和隶属度函数, 使得到的期望输出功率更为精确。同时, 在飞轮电机的功率控制策略的选择方面, 针对飞轮驱动电机——永磁同步电机, 采用基于转子磁场定向的矢量控制策略。在电流环的控制中, 针对常规的 PI 控制无法直接对正弦的参考电流达到理想的控制效果<sup>[6-7]</sup>的问题, 采用了一种基于改进 PR 控制器的转子磁链定向矢量控制策略, 避免了常规 PI 复杂的坐标转换, 以及在进行解耦控制中所带来的参数变化的影响, 提高了

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-04-20。

基金项目: 国家自然科学基金(51205185); 2012 年度江苏省“青蓝工程”中青年学术带头人项目。

作者简介: 黄煜(1989-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事储能技术在新能源领域的应用方向的研究。

控制系统的鲁棒性和稳定性。通过理论分析和建立仿真模型验证了提出方案的可行性。

### 1 系统组成

飞轮储能系统的主电路结构如图 1 所示，由直流侧电容  $C_d$ 、逆变器、飞轮单元等组成。图中，本文采用的飞轮驱动电机为具有较高效率和可靠性的永磁同步电机（PMSM）。

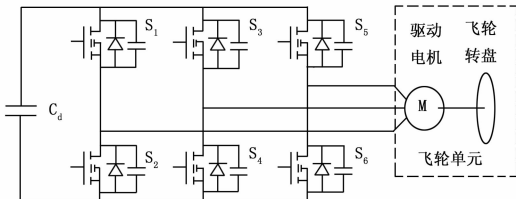


图 1 飞轮储能系统主电路结构图

### 2 有功功率波动抑制控制策略

飞轮储能系统抑制有功功率波动是通过在其转速范围内存储或释放风电机组的波动功率实现的。风机—飞轮系统输到电网的期望有功功率  $P_{reg}$ 、飞轮储能系统的参考功率  $P_{ref}$  和风机输出的有功功率  $P_{wg}$  应满足以下 (1) 式表达的关系。

$$P_{ref} = P_{reg} - P_{wg} \quad (1)$$

#### 2.1 风机—飞轮系统期望有功功率 $P_{reg}$ 的计算

飞轮的核心构件飞轮电机本身具有最高和最低转速的限制。与之对应，飞轮储能系统的功率调节作用必须在其转速范围内进行。因此，风机—飞轮系统输到电网的有功功率期望值  $P_{reg}$  应当是风机的期望输出功率  $P_{wg}$  与飞轮实时转速  $N_f$  的函数。 $P_{wg}$  和  $N_f$  是连续变量，但他们与  $P_{reg}$  之间缺少确定的数学模型。而模糊控制对于数学模型难以获取，动态特性不易掌握的对象非常适用。因此，本文引入模糊推理模块以获取风机—飞轮系统的期望有功功率  $P_{reg}$ 。

推理的基本原则如下：如果飞轮转速过高，则飞轮优先放电，风机的大部分输出功率注入电网，少量用于对飞轮充电；如果飞轮转速过低，则优先让飞轮储能，风机的输出功率大部分用于对飞轮充电，少量注入电网；如果飞轮转速适中，则飞轮按正常速度运转，系统注入电网的功率为风机期望输出功率  $P_{wg}$ ，功率的波动部分由飞轮进行调节。根据上述基本原则，模糊推理规则见表 1。

表 1 模糊推理规则

$N_f \backslash P_{wg-c}$	L	LM	M	HM	H
L	VL	VL	L	LM	M
LM	VL	L	LM	M	HM
M	L	LM	M	HM	H
HM	LM	M	HM	H	VH
H	M	HM	H	VH	VH

对不同的隶属函数进行仿真分析后，从简便角度考虑，选用三角函数。本文中模糊推理过程采用 Mamdani 推理，解模

糊过程采用平均值法。推理结果如图 2 所示。

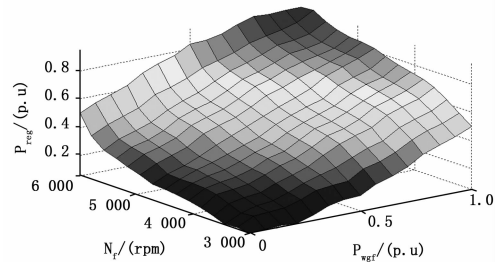


图 2 模糊推理结果

### 2.2 飞轮电机的控制策略

#### 2.2.1 飞轮电机的数学模型

PMSM 具有多变量、强耦合及非线性等特点。假设在永磁同步电机的模型中忽略磁滞、涡流损耗。对于 PMSM 的控制策略有很多研究，而矢量控制在 PMSM 中更是得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。对于面贴式永磁电机而言，气隙均匀，即有  $L_d = L_q$ 。当  $i_d = 0$  时，有  $i_s = i_q$ ，即所有的定子电流都用来产生转矩。 $i_d = 0$ （即转子磁场定向）的控制方式控制简单，能获得良好的动态性能，在实际中应用广泛<sup>[9]</sup>。因此本文中也采用了这种控制方式。在  $d-q$  坐标系下，得到的 PMSM 的简化电机的方程为：

$$\begin{cases} ud = -Pm\omega rLqiq \\ uq = Rsiq + Lq \frac{diq}{dt} + Pm\omega\psi f \\ Tem = \frac{3}{2}Pm\psi fiq \end{cases} \quad (2)$$

式中， $ud$ 、 $uq$  为直轴、交轴电压； $id$ 、 $iq$  为直轴、交轴电流； $\psi f$  为转子磁链在定子上的耦合磁链； $Pm$  为电机极对数； $Ld$ 、 $Lq$  为电机的电感。

飞轮储能系统的参考有功功率  $P_{ref}$  与飞轮驱动电机的电磁转矩  $T_{em}$  和转速  $N_f$  的关系为：

$$P_{ref} = T_{em}N_f \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可知，在已知电机转速的情况下，通过控制  $q$  轴电流分量，就能控制飞轮驱动电机的电磁转矩，从而控制飞轮储能系统的参考有功功率  $P_{ref}$ 。

#### 2.2.2 改进 PR 控制器

PR 控制器即比例谐振控制器，是由比例环节和广义积分环节组成。传递函数为：

$$GPR(s) = k_p + \frac{k_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (5)$$

式中， $\omega_0$  为谐振频率，则谐振控制器在  $\omega_0$  处的增益为无穷大，对其它频率扰动信号的增益几乎为 0。但是，PR 控制器高增益频带过窄，在非谐振频率处增益下降迅速，限制了其在实际系统中的应用。为此，采用了改进的 PR 控制器模型：

$$G'_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

改进的  $G'_{PR}(s)$  不改变在谐振频率  $\omega_0$  处为高增益的特性。通过调节  $K_i$ ，可以获得足够大的增益，以保证稳态误差

为 0; 通过增大  $\omega_c$ , 可以加大高频增益频带, 提高实际系统的稳定性。当同步电机运行时, 定子电流的角频率是变化的, 令  $\omega_0 = \omega$ , 即可实现电机定子电流的自适应调节。

### 2.2.3 基于 PR 的 PMSM 控制策略

根据传统方法, 可将系统设计为基于 PI 控制器及转子磁链定向的矢量控制系统。将  $d$ 、 $q$  轴电流进行解耦, 电流反馈和电流 PI 调节器构成双闭环。为提高系统的抗扰动能力, 通常需引入电流状态反馈和电网电压作为前馈补偿。

由于飞轮储能系统常常需要工作在较高的转速水平, 因此, 引入的交叉耦合项和前馈补偿项随温度变化而产生的参数的变化影响也会增大。而 PR 控制器可以直接对交流量实现无差跟踪, 省去了过多的坐标变化, 使控制算法更为简单。此外, 不用考虑交叉耦合项以及前馈补偿项, 优化了系统鲁棒性能。

## 3 仿真分析

根据前文的数学模型和确定的控制策略, 利用 Matlab / Simulink 仿真工具, 针对采用 PMSM 的飞轮系统, 分别就参考功率计算模块以及基于 PR 的转子磁链定向矢量控制进行仿真研究。PMSM 参数如下: 额定电压  $U_N = 575$  V, 定子电阻  $R_s = 0.1 \Omega$ , 定子电感  $L_d = L_q = 6$  mH, 电机极对数  $P_m = 3$ , 转子磁链  $\Psi_r = 0.4$  Wb。

### 3.1 基于模糊推理的期望功率计算模块仿真测试

利用 Simulink 模拟一个近似于实际风速的曲线, 将其输入到 Simulink 自带的风电场仿真模型中, 得到风机系统实际输出功率  $P_{wg}$ ; 将  $P_{wg}$  进行滤波, 得到风机期望输出功率  $P_{wgf}$ 。 $P_{wgf}$  与飞轮转速输入模糊推理模块, 得到风机—飞轮系统向电网输出的期望功率  $P_{reg}$ 。

由图 3 可见, 通过模糊推理模块计算所得的飞轮—风机系统期望功率与风机的期望输出功率相比较, 其波动更大。这是由于飞轮在进行能量调节时, 转速一直处于变化之中, 而基于模糊推理计算得到的系统期望功率  $P_{reg}$  能够考虑飞轮实时转速的影响, 从而获得更为精确的飞轮电机的参考功率  $P_{ref}$ 。

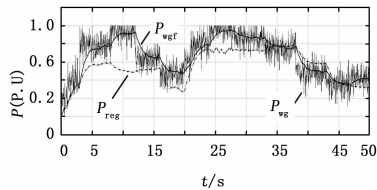
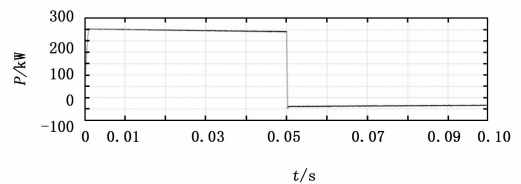


图 3  $P_{wg}$ 、 $P_{wgf}$  与  $P_{reg}$  的仿真结果示意图

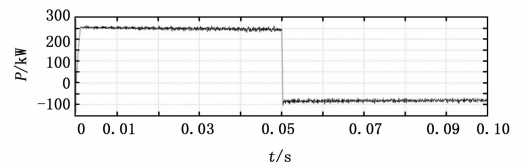
### 3.2 基于 PR 的矢量控制仿真测试

在对矢量控制的仿真部分中, 将飞轮的参考功率设置为给定值, 以简化仿真过程, 专注于测试飞轮电机控制策略的性能。设定飞轮电机的参考功率  $P_{ref} = 70$  kW,  $t = 0.05$  s 时, 功率给定突变为  $P_{ref} = -20$  kW; 飞轮电机的初始转速  $n_0 = 2000$  rpm。图 4 反应了当给定的参考功率变化时, 两种控制器的动静态功率响应。由图可见, 两种控制器均能较好得跟踪功率的变化, 有良好的动静态响应。改进 PR 控制器下, 功率

更加平滑。



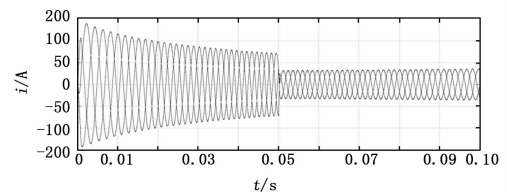
(a) 改进 PR 控制



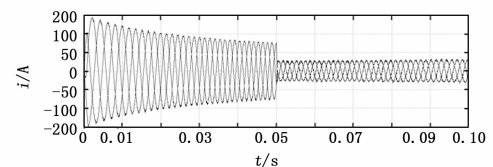
(b) 传统 PI 控制

图 4 PMSM 的功率响应

图 5 显示了当给定的参考功率发生突变时, 对应的定子电流的变化。由图可见在改进 PR 控制器下, 定子电流的脉动更小, 正弦性能更好。图 6 显示了改进 PR 控制器下, 定子的给定电流和实际电流在静止坐标系下的  $\beta$  轴分量。由图可见, 两者波形几乎重合, 这说明 PR 控制器对正弦电流的跟踪效果非常好, 几乎没有什么偏差, 可见其具有实际应用优势。验证了改进型 PR 控制器在 PMSM 控制中更具优势。



(a) 改进 PR 控制



(b) 传统 PI 控制

图 5 PMSM 的定子电流

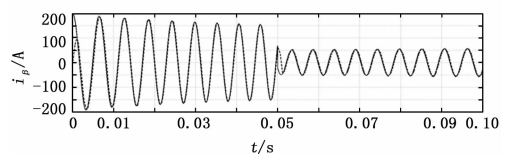


图 6 PMSM 的定子给定电流与实际电流的  $\beta$  轴分量

## 4 结语

本文针对基于 PMSM 的飞轮储能系统有功功率平滑控制策略进行了优化。利用模糊推理模块, 考虑了飞轮的实时转速对参考功率的影响。通过仿真验证了该方法能够获取更为精确的飞轮电机参考功率。将改进 PR 控制器应用于转子磁

链定向的 PMSM 矢量控制中策略，避免了电机在运行时由于温度变化而产生的参数变化的影响，结果表明该控制策略具有良好的鲁棒性和动态性能，仿真结果验证了该方法的正确性。

参考文献：

[1] 胡雪松, 孙才新, 刘 刃, 等. 采用飞轮储能的永磁直驱风电机组有功平滑控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (13) : 79 - 83.

[2] 刘世林, 孙海顺, 顾明磊, 等. 一种新型风力发电机与飞轮储能联合系统的并网运行控制 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (4) : 248 - 254.

[3] Leclercq L, Robynsa B, Graveb J M. Control based on fuzzy logic of a flywheel energy storage system associated with wind and diesel generators [J]. Mathematics and Computers in Simulation 2003, 63: 271 - 280.

[4] Suvire C O, Molina M G, Mercado P E. Improving the Integration

of Wind Power Generation Into AC Microgrids Using Flywheel Energy Storage [J]. IEEE Transactions on smart grid, 2012, 3 (4): 1945 - 1954.

[5] Cárdenas R, Peña R, Asher G, et al. Power Smoothing in Wind Generation Systems Using a Sensorless Vector Controlled Induction Machine Driving a Flywheel [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2004, 19 (1): 206 - 216.

[6] 唐 欣, 罗 安, 涂春鸣. 基于递推积分 PI 的混合型有源电力滤波器电流控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (10) : 38 - 41.

[7] 孙 强, 程 明, 周 鸷, 等. 新型双凸极永磁电机调速系统的变参数 PI 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6) : 117 - 122.

[8] 樊 东, 周国荣. 永磁同步伺服电机智能控制器的研制与开发 [J]. 计算机测量与控制, 2006, (3): 324 - 326.

[9] 曹文平, 李伟华, 王利鑫. 基于风力发电的飞轮储能系统运行控制策略综述 [J]. 华东电力, 2011, 39 (5): 782 - 787.

of Wind Power Generation Into AC Microgrids Using Flywheel Energy Storage [J]. IEEE Transactions on smart grid, 2012, 3 (4): 1945 - 1954.

(上接第 2092 页)

表 1 运动方程中各数值

缩写	名称	数值	单位	缩写	名称	数值	单位
$m$	机体总质量	12.3324	kg	$J_x$	绕 X 轴转动惯量	0.1769	$kg \cdot m^2$
$m'$	单个电机、配桨总质量	1.1661	kg	$J_y$	绕 Y 轴转动惯量	0.1769	$kg \cdot m^2$
$m''$	电调、连杆总质量	0.184	kg	$J_z$	绕 Z 轴转动惯量	0.3278	$kg \cdot m^2$
$T_0$	缆绳拉力	13	kgf	$L$	连杆长度	24.1	cm

另外本文仿真条件为： $U = 10; k_p = 1.80, k_i = 0, k_d = 3.20$  白噪声，均值 0.1，强度 0.1；得到仿真结果如图 6 所示。

图 6 中，图 (a) 为未叠加白噪声的仿真结果，图 (b) 则为叠加了白噪声的仿真结果。

4 结论

本文对四旋翼系留平台的数学建模以及控制系统设计进行了研究。推导出地面坐标系下四旋翼系留的非线性模型，并基于该模型采用 PID 方法控制器。为便于工程实现，文中对系留旋翼这个欠驱动系统进行解耦设计，通过控制各通路电流的变化量实现对飞行器各个姿态的控制。为了尽量真实的反映控制过程，还在 A/D 数据采集回路引入白噪声。本文最后对系留旋翼的俯仰控制进行了仿真，仿真结果证明，本文在所建立的数学模型基础上设计的控制系统具有较好的响应特性。

参考文献：

[1] 王树刚. 四旋翼直升机控制问题研究 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学, 2006.

[2] 谷永晟. 四旋翼无人飞行器导航控制系统研究 [J]. 遥测遥控, 2012, (3).

[3] 吴成富, 刘小齐, 袁 旭. 四旋翼无人机建模及其 PID 控制律设计 [J]. 电子设计工程, 2012, (16): 68 - 70.

[4] 刘志军, 吕 强, 王东来. 小型四旋翼直升机的建模与仿真控制 [J]. 计算机仿真, 2010, (7): 17 - 20.

[5] 杨明志, 王 敏. 四旋翼微型飞行器控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2008, (4): 485 - 487.

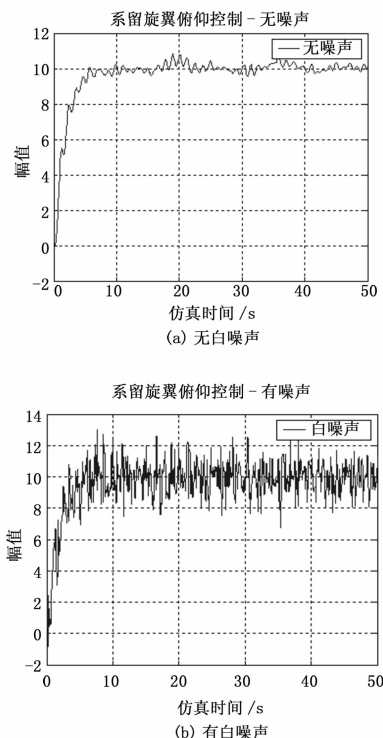


图 6 位置控制响应图