

基于模糊卡尔曼滤波和改进滑模控制的风电场飞轮储能控制策略

王世奇^{1,2}, 刘广忱^{1,2,3}, 陈国伟⁴, 张建伟^{1,2,3}, 姚强⁴, 田桂珍^{1,2,3}

(1.内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010080; 2.大规模储能技术教育部工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010080; 3.内蒙古自治区高等学校智慧能源技术与装备工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010080; 4.国网内蒙古东部电力综合能源服务有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要: 在风电场并网处配置一定容量的飞轮储能装置(FESS)可以有效平滑并网功率,提高风电场的电网友好性。为提高 FESS 的功率响应速度,增强对风电功率波动的平抑效果,同时避免在功率波动太大时储能过充/过放,文章提出了一种基于模糊卡尔曼滤波和改进滑模控制(SMC)的飞轮储能控制策略。根据 FESS 的实时转速和功率自适应调节卡尔曼增益,将滤波结果与风电场实际输出功率的差值作为滑模控制器的输入,实现对飞轮储能的功率控制。仿真结果表明,文章提出的控制策略具有较好的动态响应特性,可以有效平滑风电功率,使其满足并网要求,在平滑过程中保证飞轮转速在限定范围内,有利于延长 FESS 的使用寿命。

关键词: 风电功率; 飞轮储能; 滑模变结构控制; 卡尔曼滤波器; 模糊控制

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)07-0901-07

0 引言

为缓解化石能源枯竭和环境污染的双重压力,风力发电在能源供应中的占比不断提高。由于风速具有随机性、间歇性和不可调节性等特点,导致风电场输出的有功功率会发生较大波动,不利于电网的安全稳定运行。利用储能系统快速吞吐功率的特点,在风力发电系统中合理配置储能装置,并制定相应的控制策略,是减轻风电出力波动对并网影响的有效手段^[1,2]。飞轮储能是一种新兴的储能技术,相较于其他的储能方式,具有功率密度高、无污染、响应速度快、能量转换效率高以及使用寿命长等优势,适合为风能等间歇式能源提供瞬时功率支持^[3]。因此,研究飞轮储能装置(FESS)应用于风力发电系统中的控制策略,对扩大风电并网规模和保证风电可持续发展具有重要意义。

鉴于飞轮储能相较于其他储能方式的众多优势,很多学者都在研究 FESS 在风力发电中的应用^[4]。文献[5]在风电场出口母线处增设 FESS,设计了基于瞬时功率理论的有功功率平滑控制策略,起到了平抑风电场并网功率波动的作用,但在风电场风速扰动过大或电机内部参数发生变化时,所

采用的 PID 控制器难以满足精确的调速要求。文献[6,7]根据 FESS 的运行特性设计了积分滑模控制器,相较于传统的 PID 控制,这种非线性控制具有更强的鲁棒性和动态响应性能,但由于改进滑模控制(SMC)本身的不连续开关特性,会产生抖振的问题。文献[8,9]在传统使用的趋近率上进行改进,引入系统状态变量并设计函数,在提高系统趋近速度的同时削弱了抖振,但改进后的趋近率略显复杂,增加了控制器参数调节的难度。同时,风电场输出功率的滤波方式也对并网功率的平滑效果和储能的运行有着直接影响。文献[10]利用传统的低通滤波原理,将风电场输出功率经过低通滤波器后作为平滑目标值,但该方法没有考虑储能的荷电状态,容易造成储能的过充/过放。文献[11,12]提出了基于储能荷电状态的可变滤波时间常数控制方法,通过调整滤波时间常数使储能 SOC 保持在一定范围内,但当时间常数改变时会对风电功率的平滑效果产生影响。文献[13]设计了模糊控制算法,综合考虑风电功率波动和储能状态,动态调节储能的出力,保证了风电功率平滑和储能保护之间的平衡。但该方法下的储能会长时间运行在深度充/放电状态,对其使用

收稿日期: 2022-12-18。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51867020);内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0014,2021ZD0040)。

通信作者: 刘广忱(1975-),男,博士,教授,研究方向为新能源发电与储能控制技术。E-mail:liugc@imut.edu.cn

寿命产生影响。

本文根据飞轮储能的工作特性,研究能够同时提高并网功率平滑效果和优化 FESS 运行状态的控制算法。为提高 FESS 的功率响应速度和跟踪效果,对传统指数趋近率进行改进并设计滑模功率控制器。为保证风电功率平滑和储能保护之间的平衡,根据功率平滑效果和 FESS 的运行状态,设计模糊卡尔曼滤波器对风电功率进行滤波,并进行仿真实验,验证该控制策略的正确性和有效性。

1 系统结构及工作原理

1.1 采用 FESS 的风力发电系统结构

采用飞轮储能的风力发电系统的拓扑结构如图 1 所示。图中: P_w, P_f 分别为风电场输出功率和飞轮储能阵列的充放电功率; P_g 为输送到电网的有功功率。通过控制能量在飞轮与电网之间以机械能和电能的形式相互转换并传递,以实现功率平滑的目的。

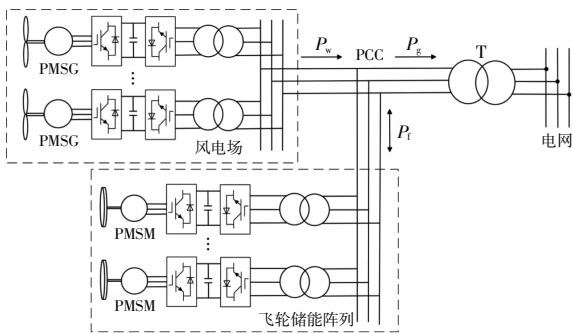


图 1 采用飞轮储能的风力发电系统结构

Fig.1 Structure of wind power generation system with FESS

多台 FESS 组成储能阵列,通过背靠背双 PWM 变流器连接到风电场出口母线处,此时二者视为一个联合发电系统,再通过升压变压器接入电网。系统内的风力发电机与飞轮电机均采用永磁同步电机(PMSG),由于多数风电场内风机的型号相同,储能阵列中的飞轮电机也采用统一型号,因此,本文取该系统内的单台风机和飞轮为例进行研究。

1.2 平滑风电功率的工作原理

图 2 为利用飞轮储能平滑风电功率的原理曲线。

从图 2 中的功率曲线可以更加直观地看出平滑功率的实现原理,其中 P_g^* 为期望的网侧功率,

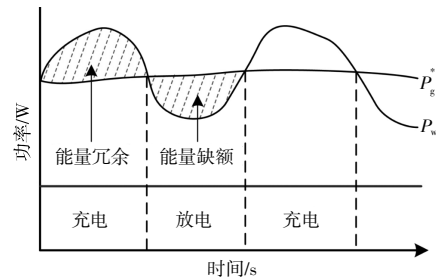


图 2 利用飞轮储能平滑风电功率的原理

Fig.2 Principle of smoothing wind power using FESS

一般由风机实际输出功率 P_w 经滤波平滑处理后得到。当 P_w 高于 P_g^* 时,须要控制飞轮电机加速,将能量冗余转化为机械能储存起来;而当 P_w 低于 P_g^* 时,则须要控制飞轮电机减速,将机械能转化为电能补偿能量缺额。

2 飞轮储能的控制策略研究

飞轮储能的控制策略由机侧和网侧变换器两部分的控制组成,由于直流环节的解耦作用,机、网侧变换器可实现独立控制。通常,机侧变换器采用功率外环、电流内环的双闭环控制策略,控制飞轮电机的输出功率;网侧变换器控制直流母线电压恒定,可以认为送入电网的功率完全由机侧控制决定,因此本文只对飞轮储能机侧变换器的控制策略进行研究。

2.1 飞轮储能机侧变换器控制策略

受风速变化影响,飞轮储能需要频繁地对 FESS 进行充放电控制,以达到平滑并网功率的目的。在风速变化过快或电机内部参数发生变化时,PI 控制难以满足快速精确的功率跟踪要求。相对于 PI 控制,SMC 具有鲁棒性强、对内部参数变化不敏感、动态响应速度快等特点,因此本文在控制外环中采用 SMC,以提升功率控制的性能。同时,本文设计卡尔曼滤波并加入模糊推理对 FESS 的参考功率进行实时修正,在提高并网电能质量的同时减小飞轮转速的越限机率,整体的控制框图如图 3 所示。

2.2 改进滑模变结构控制器设计

飞轮储能侧变流器功率环的控制目标是使 FESS 输出的有功功率 P_f 能够准确跟随给定功率 P_{ref} ,则可定义控制器的状态变量 x_e 为

$$x_e = P_{ref} - P_f \quad (1)$$

构造积分滑模面为

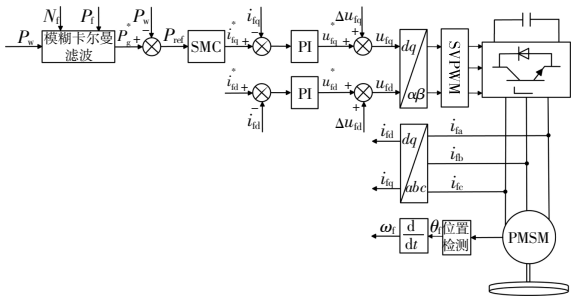


图3 飞轮储能机侧变换器控制框图

Fig.3 Control frame diagram of FESS machine-side converter

$$s = x_e + c \int_{-\infty}^t x_e(\tau) d\tau, \quad c > 0 \quad (2)$$

式中: c 为积分项系数。

对式(2)进行微分,联立飞轮功率方程 $P = \omega T_e$ 可得:

$$\dot{s} = \dot{P}_{ref} - \dot{T}_e \omega_m - T_e \dot{\omega}_m + c(P_{ref} - T_e \omega_m) \quad (3)$$

式中: T_e 为飞轮电机的电磁转矩; ω_m 为飞轮电机的机械角速度。

采用设计趋近率的方式来保证运动阶段的品质,最常使用的为指数趋近率。

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks, \quad \varepsilon, k > 0 \quad (4)$$

式中: s 为滑模面函数; $\varepsilon \text{sign}(s)$ 为等速趋近项,减小 ε 可以减小到达滑模面时的速度从而减小抖振,但增加了收敛时间; $-ks$ 为指数趋近项,增大 k 可以加快收敛速度,但容易引起抖振。

须要合理选择 ε 和 k 才能保证趋近运动快速性的同时削弱抖振。

本文在传统指数趋近率中引入系统状态变量并设计切换函数,提出了一种改进的指数趋近率。

$$\begin{cases} \dot{s} = -\varepsilon f(x_e) \tanh(s/\delta) - k |x_e|^\alpha s, \quad \varepsilon, k, \alpha > 0 \\ f(x_e) = \frac{1}{a \log_{10}(|x_e| + 10) + |x_e| + 1}, \quad a > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 和 a 分别为调节指数项和变项项变化速率的正常数; $f(x_e)$ 为关于状态变量 x_e 的函数; $\tanh(s/\delta)$ 为改进双曲正切函数,其相对于传统符号函数更加光滑连续,可以减弱在滑模面上频繁切换带来的抖振。

当系统状态离滑模面较远时, x_e 和 $f(x_e)$ 也较大,系统在 $-\varepsilon f(x_e) \tanh(s/\delta)$ 和 $-k |x_e|^\alpha s$ 的共同作用下趋近于滑模面,增大了远离滑模面时的趋近速度。当系统状态运动在滑模面附近时, x_e 趋近于

0, $-\varepsilon f(x_e) \tanh(s/\delta)$ 起主要趋近作用,其中 $f(x_e) \approx a/(a+1) < 1$, 减小了在滑模面附近的趋近速度,从而削弱了速度太大引起的抖振。

采用本文提出的改进指数趋近率,结合式(3)可推得控制器输出的 q 轴电流参考信号。

$$\begin{cases} i_q^* = \frac{2}{3p\psi_f \omega_m} \int \left[\dot{P}_{ref} - T_e \dot{\omega}_m + f(x_e) \tanh(s/\delta) + \right. \\ \left. k |x_e|^\alpha s + c(P_{ref} - T_e \omega_m) \right] dt \\ f(x_e) = \frac{1}{a \log_{10}(|x_e| + 10) + |x_e| + 1}, \quad a > 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.3 模糊卡尔曼滤波器设计

针对传统低通滤波器存在相位延迟、风电功率骤变时容易发生飞轮转速越限的问题,本文设计模糊卡尔曼滤波器实现风电输出功率的实时滤波。

2.3.1 卡尔曼滤波器设计

为应用卡尔曼滤波实现风电功率平滑的控制要求,对卡尔曼滤波器模型进行了修正,得到预测方程和更新方程。

预测方程为

$$\left(\hat{P}_{wind} \right)_k^- = \left(\hat{P}_{grid} \right)_{k-1} \quad (7)$$

$$\bar{P}_k = P_{k-1} + Q \quad (8)$$

更新方程为

$$K_k = \frac{\bar{P}_k^-}{\bar{P}_k^- + R} \quad (9)$$

$$\left(\hat{P}_{grid} \right)_k = \left(\hat{P}_{wind} \right)_k^- + K_k \left[\left(P_{wind} \right)_k - \left(\hat{P}_{wind} \right)_k^- \right] \quad (10)$$

$$P_k = \bar{P}_k^- (1 - K_k) \quad (11)$$

式中: $\left(\hat{P}_{wind} \right)_k^-$ 为 k 时刻先验状态估计值; $\left(\hat{P}_{grid} \right)_{k-1}$, $\left(\hat{P}_{grid} \right)_k$ 分别为 $k-1$ 时刻和 k 时刻的后验状态估计值; \bar{P}_k^- 为 k 时刻的先验估计的协方差; P_{k-1} , P_k 分别为 $k-1$ 时刻和 k 时刻的后验估计的协方差; Q , R 分别为过程噪声和测量噪声的协方差; K_k 为卡尔曼增益; $\left(P_{wind} \right)_k$ 为滤波器的输入,也就是风机的实际输出功率值。

最终的滤波结果是通过状态预测值和观测值的加权线性组合得到的, K_k 即为权系数,由式(9)可知, K_k 的大小主要由 R 值决定。

2.3.2 模糊推理规则设计

传统卡尔曼滤波器的参数是固定的, 面对风电功率的随机波动无法达到理想的滤波效果, 尤其当风电功率骤变的时候容易发生滤波功率偏移的情况, 引起飞轮转速越限. 因此本文通过模糊控制将FESS 的运行状态引入滤波过程, 设计的模糊控制器输入为 FESS 的吸收功率 P_f 和飞轮转速 N_f , 输出为卡尔曼滤波器的参数 R , 输入、输出变量的隶属度函数如图 4 所示。

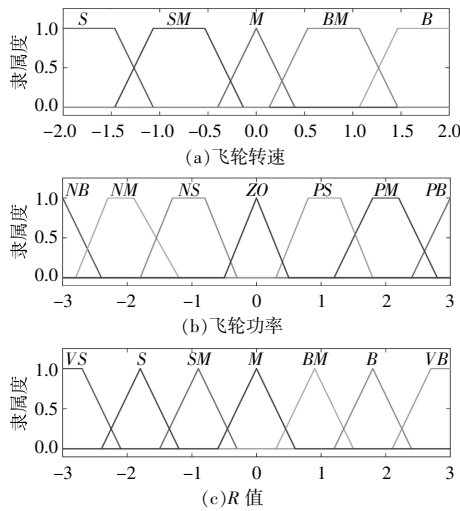


图 4 输入、输出变量的隶属函数

Fig.4 Membership functions of input and output variables

设计模糊推理的基本思想: 当飞轮转速偏低时, 若 FESS 参考功率为负值(放电指令), 则增大卡尔曼增益(减小 R), 防止储能过放; 若为充电指令, 则减小卡尔曼增益(增大 R), 加大储能的充电功率, 使得飞轮转速快速恢复到中间区域; 当飞轮转速到达上限仍为充电指令, 或到达转速下限仍为放电指令时, 则控制 FESS 不再动作, 直到释放/吸收功率至转速恢复到正常。模糊推理结果如图 5 所示。

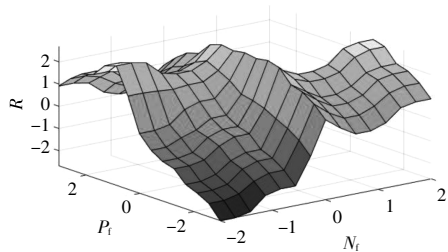


图 5 模糊推理结果

Fig.5 Fuzzy reasoning result

3 仿真结果及分析

为验证本文提出的 FESS 控制策略的性能,

根据图 3 所示的控制系统框图搭建仿真模型。

3.1 模糊卡尔曼滤波的仿真结果及分析

取风电场内单台 3 MW 风机的输出功率波形, 如图 6 所示。

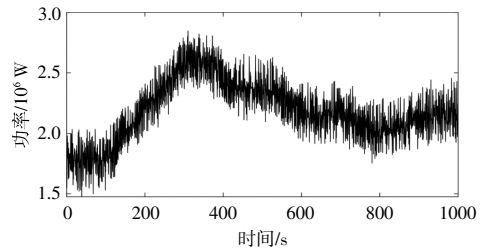
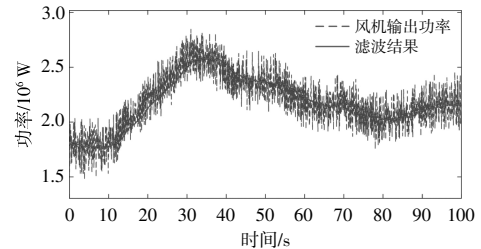


图 6 3 MW 风机的实际输出功率波形

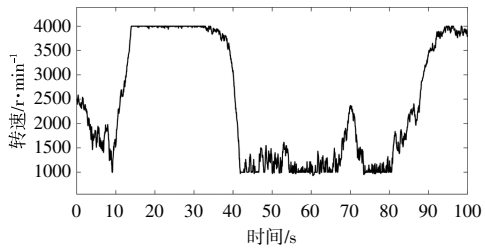
Fig.6 Actual output power waveform of 3 MW wind turbine

为缩短仿真时间, 对数据长度等比缩小 10 倍, 并以此为基础建立控制系统的仿真模型, 分别采用传统卡尔曼滤波和模糊卡尔曼滤波对风电功率进行滤波, 并对仿真结果进行分析。

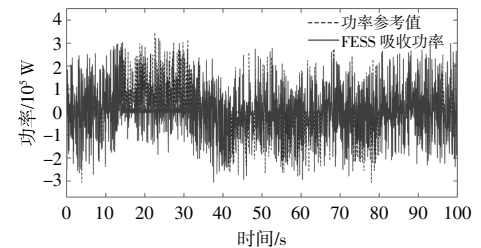
方案 1: 采用传统的定参数卡尔曼滤波器对风电功率进行滤波(图 7), 飞轮的初始转速为 2 500 r/min, 最高和最低转速分别为 4 000 r/min 和 1 000 r/min。



(a) 滤波结果



(b) 飞轮转速



(c) FESS 功率

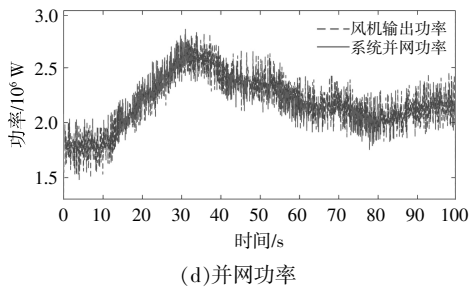


图7 采用定参数卡尔曼滤波的功率平滑效果
Fig.7 Power smoothing effect with constant parameter Kalman filter

由图7可知:在10~30 s风电功率骤升时,滤波的滞后性导致了此时段需要 FESS 吸收的功率更多,飞轮转速出现了运行至上限的情况;在40~80 s风电功率骤降时,滤波也存在一定的滞后,导致飞轮转速运行在转速下限,此时 FESS 仅可以吸收功率;当风机功率变化较大、飞轮转速运行至限幅时,FESS 不再具有平滑功率的能力。因此采用此方式不利于风电并网运行的稳定性,并且飞轮长时间运行于边界转速会影响其使用寿命。

方案2:采用本文提出的模糊卡尔曼滤波对风电功率进行滤波,并网功率平滑效果见图8。

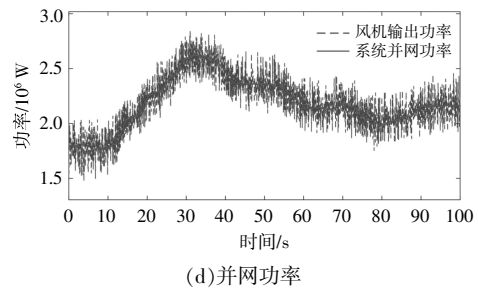
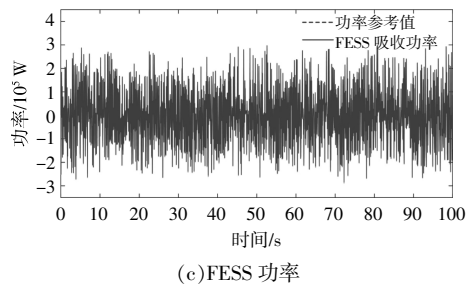
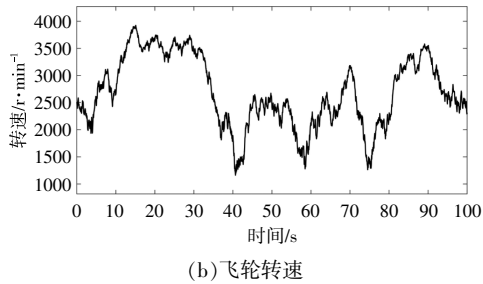
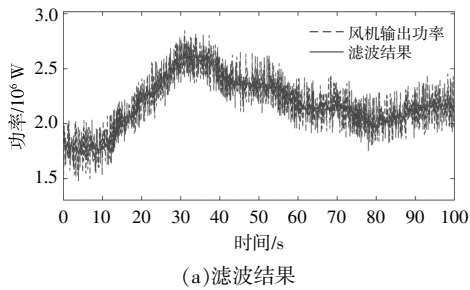


图8 采用模糊卡尔曼滤波的并网功率平滑效果
Fig.8 Power smoothing effect with fuzzy Kalman filter

由图8可知:相较于传统卡尔曼滤波,在风电功率骤升或骤降时,模糊卡尔曼滤波通过对滤波增益的实时调整,明显削弱了滤波结果的滞后现象;飞轮转速始终运行在转速限制内,虽然在10~30 s风电功率骤升时,飞轮转速升到转速上限附近,但在30~40 s又通过模糊控制使飞轮转速恢复到了中间范围;FESS 始终跟随给定功率动作,满足功率跟随的快速性和准确性要求;并网功率波形与滤波结果几乎一致。采用模糊卡尔曼滤波器可以有效平滑风电系统的并网功率,能够满足对 FESS 的转速控制要求。

3.2 并网功率评估

为评估并网功率是否满足并网要求,本文将风机实际输出功率、采用定参数卡尔曼滤波和模糊卡尔曼滤波的并网功率表示在同一图窗,并将时间尺度恢复至1000 s(图9),在功率变化量和波动频率两方面对并网功率进行评估。

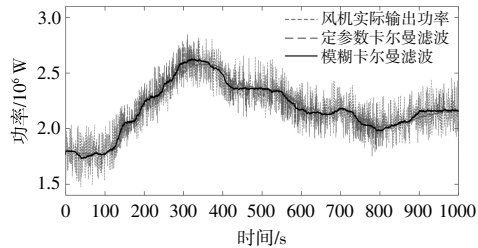


图9 风储系统的并网功率波形
Fig.9 Grid-connected power waveform of wind storage system

3.2.1 功率变化量

为减缓并网功率波动对电网安全稳定运行的冲击,我国制定了标准风电场接入电力系统技术规定(GB/T 19963.1—2021),分别限制1 min和10 min内风电并网功率最大变化量不超过风电场装机容量的1/10和1/3。图10为并网功率波动的最大值对比。由图10可知:采用定参数卡尔曼滤波的方法,存在功率变化量超过限制的时段;采用

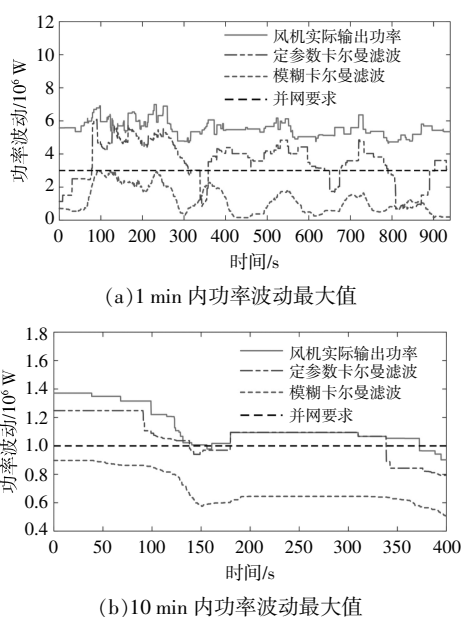


图 10 1 min 和 10 min 内的功率波动最大值

Fig.10 Maximum power fluctuations in 1 min and 10 min

模糊卡尔曼滤波的方法，功率变化量在仿真过程中始终满足并网要求。

3.2.2 功率波动频率

有关风机滤波频率特性的研究表明,0.01~1 Hz 内的功率波动对电网的影响最大，因此加入 FESS 的目标就是对该频段内的功率波动进行平滑。本文对该频段内的并网功率幅频特性进行了分析,结果如图 11 所示。

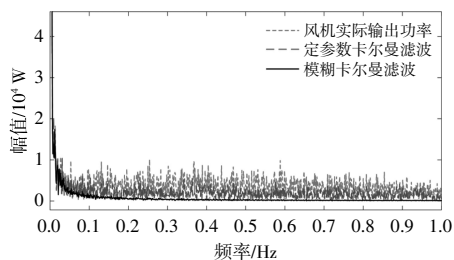


图 11 并网功率的幅频特性曲线

Fig.11 Amplitude-frequency curve of grid-connected power

由图 11 可知：由于风速的随机性和波动性，风机实际的输出功率在 0.01~1 Hz 内存在较高的分量；采用定参数卡尔曼滤波虽然降低了该频段内的功率波动分量,但效果不够明显,仍会影响电网的稳定运行；模糊卡尔曼滤波通过在平滑过程中实时地修正滤波器参数，在整个仿真时段均能实现并网功率的平滑，有效削弱了 0.01~1 Hz 内的功率波动,提高了风电场的电网友好性。

4 结论

本文提出了用于平滑风电并网功率的飞轮储能控制策略，设计了模糊卡尔曼滤波器对风电场输出功率进行滤波处理，并采用改进滑模控制实现 FESS 输出功率的快速准确跟踪，得到以下结论。

①设计的模糊卡尔曼滤波器对风电功率进行滤波时综合考虑了功率平滑效果和 FESS 状态，保证了风电功率平滑和储能保护之间的平衡。

②在传统指数趋近率中引入系统状态变量进行改进,设计 FESS 滑模功率控制器,提高系统趋近速度的同时削弱抖振。

③所提出的控制策略能够控制 FESS 有效平滑风电场输出功率,使并网功率满足系统规定,且在平滑过程中满足对飞轮转速的控制要求。

参考文献:

- [1] De Siqueira L M S, Peng W. Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102252.
- [2] Barra P H A, De Carvalho W C, Menezes T S, et al. A review on wind power smoothing using high-power energy storage systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 137: 110455.
- [3] 刘颖明, 徐中民, 王晓东. 基于双模糊算法的风电机组储能系统优化控制 [J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2180-2185.
- [4] Hasanién H M, Tostado-Véliz M, Turky R A, et al. Hybrid adaptive controlled flywheel energy storage units for transient stability improvement of wind farms [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 54: 105262.
- [5] Mansour M, Mansouri M N, Bendoukha S, et al. A grid-connected variable-speed wind generator driving a fuzzy-controlled PMSG and associated to a flywheel energy storage system [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 180: 106137.
- [6] 刘颖明, 王维, 王晓东, 等. 基于滑模控制器的风电场飞轮储能系统的控制方法 [J]. 电器与能效管理技术, 2017, 59(10): 25-28.
- [7] Ding J, Han L, Ge L, et al. Robust locomotion exploiting multiple balance strategies: An observer-based cascaded model predictive control approach [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(4):

- 2089–2097.
- [8] Pan H,Zhang G,Ouyang H,et al.A novel global fast terminal sliding mode control scheme for second-order systems[J].IEEE Access,2020(8):22758–22769.
- [9] 陈德海,曹永康,阳攀.基于变指数趋近律的永磁同步电机滑模控制[J].电机与控制应用,2022,49(2):8–13.
- [10] 刘颖明,徐中民,王晓东.考虑飞轮储能的风电场有功功率平滑控制[J].储能科学与技术,2015,4(2):194–197.
- [11] 冯春生,杨秀媛,陈小波.考虑储能荷电状态平抑风电功率的抛物线规则变滤波时间常数方法[J].现代电力,2020,37(5):518–525.
- [12] Liao K,Lu D,Wang M,et al.A low-pass virtual filter for output power smoothing of wind energy conversion systems[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2022,69(12):12874–12885.
- [13] Tziouvani L,Hadjidemetriou L,Charalampous C,et al. Energy management and control of a flywheel storage system for peak shaving applications [J].IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(5):4195–4207.

Control strategy of FESS in wind farms based on fuzzy Kalman filter and improved sliding mode control

Wang Shiqi^{1,2}, Liu Guangchen^{1,2,3}, Chen Guowei⁴, Zhang Jianwei^{1,2,3}, Yao Qiang⁴, Tian Guizhen^{1,2,3}
(1.Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 2.Engineering Research Center of Large Energy Storage Technology, Ministry of Education, Hohhot 010080, China; 3.Intelligent Energy Technology and Equipment Engineering Research Centre of Colleges and Universities in the Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010080, China; 4.State Grid East inner Mongolia Electric Power Synthesis Energy Co.,Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract: Installing a certain capacity of flywheel energy storage system (FESS) at the grid connection of wind farms can effectively smooth the grid-connected power and improve the grid-friendliness of wind farms. To improve the power response speed of FESS and enhance the smoothing effect of wind power fluctuation while avoiding overcharge/overdischarge of FESS, this paper proposes a control strategy for FESS based on a fuzzy Kalman filter and the improved sliding mode control(SMC). The Kalman gain is adaptively adjusted according to the real-time speed and power of FESS. The difference between the filtering result and the wind farm output power is used as the input of the SMC to realize the power control of FESS. The simulation results show that the control strategy proposed in this paper has good dynamic response characteristics and the wind power can be effectively smoothed, thus meeting the requirements of grid connection. The flywheel speed is kept within the limit during the smoothing process, which extends the service life of FESS.

Keywords: wind power; flywheel energy storage; sliding mode control; Kalman filter; fuzzy control