

含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统有功功率平滑控制

熊倩, 廖勇, 姚骏

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 在分析传统直驱永磁风力发电系统运行特性和飞轮储能系统控制的基础上, 研究并提出了适用于该发电系统的功率平滑控制策略, 所提控制策略无需测量风速。建立了控制系统小信号模型, 分析表明所提控制系统在小扰动条件下可保持稳定运行。对含飞轮储能单元的永磁同步风力发电机控制系统进行了仿真计算, 仿真结果表明所提控制策略在保证最优风能捕获的前提下可实现良好的系统输出功率平滑控制。

关键词: 风电; 同步发电机; 有功功率平滑控制; 飞轮; 小信号分析; 功率控制; 储能

中图分类号: TM 862; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.018

0 引言

随着我国对可再生能源特别是风力资源的大规模开发和利用, 大型变速恒频风力发电技术得到长足发展和普遍应用^[1-4]。由于风能为不稳定能源, 风速具有不可控性、不可准确预期性和随机波动等特性, 使得风力发电机组输出有功功率随风速的变化而波动。随着风电容量在电网中所占比重的增加, 大规模并网风电功率的波动性将会对电网电压和频率产生显著影响, 会带来诸如系统电压波动、频率波动以及闪变等一系列电能质量问题, 这无疑会恶化电网的运行特性, 增加电力系统运行与控制的难度^[5-7]。为改善风电接入电网的电能质量, 希望风电机组在风速波动情况下亦能产生较为平滑的有功输出, 满足系统调频和调压等运行需求。因此, 进一步研究有关风电机组输出有功功率平滑的运行控制策略, 对于增强电网消纳大规模风电的能力、改善风电系统并网运行特性以及有效利用风能资源而言具有重要的现实意义。

目前, 已有不少文献针对风电机组输出功率平滑控制展开研究。文献[8]采用变桨距和转矩动态控制相结合的方式实现永磁直驱风力发电机的输出功率平滑控制, 在可靠限制发电机转速运行范围的同时可有效降低发电机输出功率的波动, 其功率输出平滑控制的效果十分优秀, 但所提控制方案存在风能利用率大幅降低的问题。文献[9-12]利用电池储能系统与风电机组相结合实现风电系统输出功率平滑, 虽然电池储能系统具有技术较为成熟的优势, 但其也存在成本高、需定期维护以及具有环境污染性等缺点。相比于现有的储能方式, 飞轮储能系统采用电机驱动飞轮的方式实现惯性储能, 具有较快的充/放电速度、高功率密度、循环使用寿命

长、储能稳定、能量转换效率高、无环境污染、成本较低和易于在现有风电系统中加装和使用等优点, 非常适合用作现有风电系统的储能元件和能量缓冲装置, 以实现风电机组秒级至分钟级的功率平滑控制。文献[13]采用飞轮储能系统辅助风电机组实现有功功率平滑控制, 在很大程度上提高了风电系统的并网电能质量。但所提控制方案需利用或预测风速来形成功率平滑指令信号, 由于风速的不确定性, 将会使得该指令信号难以准确获取, 从而限制其在实际系统中的应用。

本文在分析传统直驱永磁同步风力发电系统以及飞轮储能系统运行控制特性的基础上, 提出一种适用于含飞轮储能单元的直驱永磁风电系统整体协调运行控制策略, 所提方案无需测量风速信号。通过建立含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统的小信号模型, 进一步分析了整个控制系统的稳定性并研究了系统相关参数对系统运行行为的影响。通过对 1.5 MW 直驱永磁风力发电系统进行仿真计算和分析, 验证了全风况条件下所提控制策略抑制输出功率波动的正确性和有效性。

1 含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统模型

图 1 为含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统图, 该系统在永磁同步发电机并网双 PWM 变

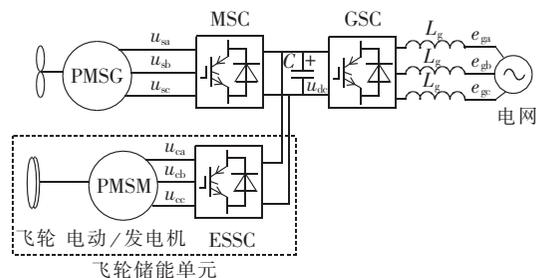


图 1 含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统
Fig.1 Direct-driven PMSG system with FESU

收稿日期: 2012-02-17; 修回日期: 2013-03-20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007097)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51007097)

换器的直流侧引入飞轮储能系统,通过协调控制 3 个功率变换器来提高直驱永磁风力发电系统的输出电能质量。

飞轮储能单元由高速飞轮、轴承支撑系统、电动/发电机、电力电子功率变换器和真空泵等设备组成。为实现灵活的电动/发电运行、宽范围的速度调节以及较快的系统动态响应速度,本文采用高速永磁同步电机作为电动/发电一体机,永磁同步电机经一个三相 PWM 变换器后连接至并网双 PWM 变换器的直流侧,通过控制永磁同步电机实现飞轮的充电加速控制和放电减速控制,从而实现飞轮储存机械能与电能的相互转换。通过协调控制储能功率变换器(ESSC)、电机侧变换器(MSC)以及电网侧变换器(GSC),可使得该风力发电系统在获得最优风能利用的同时有效平滑其输出功率。

1.1 电机侧变换器控制

与风轮机直接相连的电机转速很低,常采用多极表贴式永磁同步电机;为使电机快速储存/释放飞轮惯性能以实现功率交换,飞轮驱动电机亦采用永磁同步电机。采用转子磁场定向方式,在 dq 同步旋转轴系下永磁同步电机的数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{di_{id}}{dt} &= -\frac{R_i}{L_{id}}i_{id} - p_i\omega_i\frac{L_{iq}}{L_{id}}i_{iq} + \frac{1}{L_{id}}u_{id} \\ \frac{di_{iq}}{dt} &= p_i\omega_i\frac{L_{id}}{L_{iq}}i_{id} - \frac{R_i}{L_{iq}}i_{iq} + \frac{p_i\psi_i}{L_{iq}}\omega_i + \frac{1}{L_{iq}}u_{iq} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $i = s, f$ (s 表示发电机侧, f 表示飞轮电机侧); i_{id} 、 i_{iq} 、 u_{id} 、 u_{iq} 分别为电机定子 d 、 q 轴电流和电压; R_i 为

定子电阻; L_{id} 、 L_{iq} 分别为定子 d 、 q 轴电感,且 $L_{id} = L_{iq}$; p_i 为电机极对数; ψ_i 为转子永磁体磁链; ω_i 为电机机械转速。

永磁同步发电机转矩动态方程为:

$$\frac{d\omega_s}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - F\omega_s - T_m) \quad (2)$$

其中, J 为风轮机和发电机的等效转动惯量; T_m 为风轮机输出转矩; T_e 为发电机电磁转矩; F 为风轮机和发电机粘滞摩擦系数,在此系统中忽略不计。

额定风速以下,采用最佳风能跟踪控制实现风电系统的最大风能捕获,发电机参考功率表示为:

$$P^* = P_{opt} = k\omega_s^3 \quad (3)$$

其中, $k = 0.5\rho\pi R^5 C_{pmax} / \lambda_{opt}^3$, ρ 为空气密度, R 为风轮半径, C_{pmax} 为最大风能利用系数, λ_{opt} 为最佳叶尖速比; ω_s 为风轮机和发电机转速。

额定风速以上,采用变桨距控制,发电机以满功率运行。全风况下发电机控制方案如图 2 所示。

飞轮可等效为具有一定转动惯量的质量块,忽略损耗,则作用在飞轮上的转矩为驱动电机的电磁转矩,可表示为:

$$T_f = T_{ef} = p_f\psi_f i_{fq} = -J_f \frac{d\omega_f}{dt} \quad (4)$$

其中, J_f 为飞轮转子和飞轮驱动电机的总转动惯量。

飞轮电机采用功率、电流双闭环运行控制方式,外环功率给定是整个发电系统所需平滑的有功功率指令,控制框图见图 2。其中, $\Delta u_{id} = -p_f\omega_f L_f i_{fq}$, $\Delta u_{iq} = p_f\omega_f L_{fd} i_{fd} + p_f\omega_f \psi_f$, $p_f = u_{fd} i_{fd} + u_{fq} i_{fq}$ 。

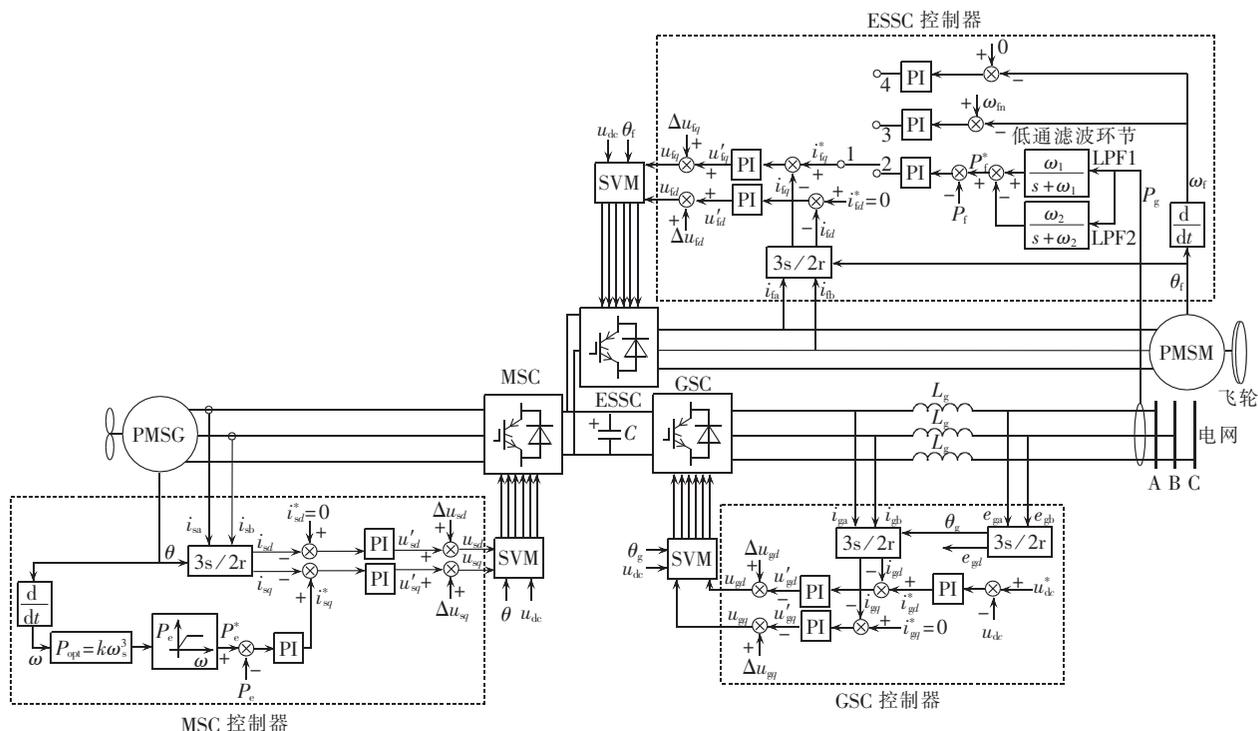


图 2 整体系统控制框图

Fig.2 Block diagram of overall system control

1.2 电网侧变换器控制

采用电网电压定向方式,则 dq 同步旋转轴系下网侧变换器数学模型为:

$$\begin{aligned} \frac{di_{gd}}{dt} &= -\frac{R_g}{L_g}i_{gd} + \omega_g i_{gq} - \frac{1}{L_g}u_{gd} + e_{gd} \\ \frac{di_{gq}}{dt} &= -\omega_g i_{gd} - \frac{R_g}{L_g}i_{gq} - \frac{1}{L_g}u_{gq} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, i_{gd} 、 i_{gq} 、 u_{gd} 、 u_{gq} 分别为网侧 d 、 q 轴电流和控制电压分量; R_g 、 L_g 分别为进线电抗器电阻和电感; ω_g 为电网同步电角速度; e_{gd} 为电网电压 d 轴分量。

电网侧变换器采用传统的电压、电流双闭环矢量控制方式^[14],控制框图如图2所示。其中, $\Delta u_{gd} = \omega_g L_g i_{gq} + e_{gd}$, $\Delta u_{gq} = -\omega_g L_g i_{gd}$ 。忽略变换器损耗,直流环节可表示为:

$$C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_g - P_e - P_f \quad (6)$$

其中, C 为直流电容值; u_{dc} 为直流链电压; P_g 为并网有功功率; P_e 为发电机有功功率; P_f 为飞轮有功功率。

电机侧变换器控制框图如图2所示。其中, $\Delta u_{sd} = -p_s \omega_s L_{sq} i_{sq}$, $\Delta u_{sq} = p_s \omega_s L_{sd} i_{sd} + \omega_s \psi_s$, $P_e = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}$ 。

2 发电系统功率平滑控制策略

2.1 功率平滑控制策略

利用飞轮系统作为整个发电系统的中间能量暂存环节,实现网侧有功功率平滑输出的关键在于获得合适的飞轮电机外环功率给定指令。传统的功率平滑指令大都利用风速平均算法获取,由于风速测量精度不高且非常不稳定,由此所产生的功率平滑指令并不准确,甚至有可能导致整个控制系统不稳定,降低了系统运行的可靠性。为避免直接估算或测量风速,提高直驱永磁发电系统功率平滑控制的可靠性和准确性,本文提出一种新的功率平滑指令计算方法。

飞轮电机所需平滑的功率指令应反映出对网侧输出波动功率的接纳或补充,本文利用具有不同截止频率的低通滤波环节来构造功率平滑指令,将网侧输出有功功率分别经2个一阶低通滤波器滤波后作差来作为飞轮电机的功率给定,即:

$$P_f^* = P_g \left(\frac{\omega_1}{s + \omega_1} - \frac{\omega_2}{s + \omega_2} \right) \quad (7)$$

其中, ω_1 、 ω_2 分别为2个一阶低通滤波器的截止角频率; P_f^* 为飞轮电机的功率给定。

由式(7)可知,如果取较低的截止角频率 ω_1 ,则网侧有功功率将变得较为平滑,这恰好满足网侧输出功率波动小的运行目标;而取较高的截止角频率 ω_2 ,又可得网侧有功功率能够迅速反映输入功率的变化。因此在经过具有不同截止频率的低通滤波环节之后,网侧有功功率的偏差可以正确及时地反

映网侧输出功率的波动,该波动功率可以作为飞轮电机的功率参考值,经功率、电流双闭环控制后,可使飞轮电机发出满足功率平滑所需的有功功率。当输出功率有余时,飞轮系统储存多余的能量;当输出功率不足时,飞轮系统释放部分能量,起到一定程度的削峰和填谷作用。由式(7)进一步可知,当网侧输出功率稳定时,飞轮给定功率趋近于零,这时无需飞轮系统参与发电系统能量交换。因此无论在何种风况下,由式(7)均可得到稳定的飞轮电机功率参考,且系统实现较为简单。

2.2 飞轮电机速度越限控制策略

在连续充电或放电模式下,飞轮驱动电机处于连续加速或减速状态。当电机加速到最高转速时,为防止超速应将电机转速限制在最高转速,此时应切换电机的外环工作模式,将功率/电流闭环控制模式切换为转速/电流闭环控制模式,如图2中将模式1-2切换为1-3,转速给定设定为飞轮电机最高转速,此时飞轮系统不参与发电系统能量交换,飞轮电机仅从直流侧吸收少量功率维持恒速运行,而发电机的功率将直接经网侧变换器馈入电网。该过程将一直持续直至飞轮电机获得减速信号,此时转速/电流闭环控制又重新切换为功率/电流闭环控制,飞轮系统重新参与发电系统能量交换。当飞轮电机连续减速至零时,为保证其安全稳定运行,应将电机转速控制为零,将模式1-2切换为1-4。与限制最高转速控制模式类似,通过采用转速/电流闭环控制实现飞轮电机在零速的情况下运行,此时飞轮系统亦不参与能量交换,直至要求飞轮电机重新进入加速状态。

3 控制系统小扰动分析

飞轮储能单元作为辅助控制系统以实现直驱永磁风力发电系统输出有功功率平滑控制,辅助控制器本身可能存在稳定性问题,加入辅助控制器也可能影响整体系统的稳定性,且由式(7)可知,截止角频率 ω_1 、 ω_2 的正确选取对系统输出功率的平滑作用及系统的稳定运行有着显著影响。因此有必要建立融合3个功率变换器的整个系统小信号模型对整体系统进行稳定性分析。进一步评估系统关键参数对系统稳定性的影响,为控制系统的参数选取和优化设计奠定基础,也对整体系统的稳定性进行评估。

3.1 控制系统小信号模型

为便于实际测量且能够完全表征系统的运动状态,选取构成了含飞轮储能系统的直驱永磁风力发电系统模型的发电机电流和转速、飞轮电机电流、网侧电流和电压为系统的状态变量,对式(1)、

(2)、(5)、(6)取增量形式形成系统特征方程组^[15-16]。

变换器与直流链电压存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} u_{id} \\ u_{iq} \end{bmatrix} = \frac{M_i}{2} \begin{bmatrix} \cos \sigma_i \\ \sin \sigma_i \end{bmatrix} u_{dc} \quad (8)$$

稳态时,有:

$$\sigma_{i0} = \arctan(u_{iq0}/u_{id0}), \quad M_{i0} = 2\sqrt{u_{id0}^2 + u_{iq0}^2} / u_{dc0}$$

其中, $i = s, g$ (s 代表电机侧变换器, g 代表电网侧变换器); M 为调制度; 在电机侧 σ 为电机感应电势与变换器输入电压之间的夹角, 而电网侧中 σ 为变换器输出电压与电网电压间的夹角。

对于飞轮电机系统, 设 d 轴电流环比例系数为 K_1 、功率环比例系数为 K_2 、 q 轴电流环比例系数为 K_3 、积分时间为 T_i , 代入 d 轴控制电压方程得:

$$u_{id} = K_1[(i_{id}^* - i_{id}) + \int (i_{id}^* - i_{id}) dt / T_i] - p_f \omega_f L_{fd} i_{fd} \quad (9)$$

取增量形式得:

$$\Delta u_{id} = K_1(\Delta i_{id}^* - \Delta i_{id}) + K_1(\Delta i_{id}^* - \Delta i_{id}) \Delta t / T_i - p_f \omega_{f0} L_{fd} \Delta i_{fd} - p_f L_{fd} i_{fd0} \Delta \omega_f \quad (10)$$

因 $\Delta t \rightarrow 0, i_{id}^* = 0$, 稳态情况下发电机输出功率恒定, 飞轮电机给定功率趋近于零, 即飞轮所发功率趋近于零。则:

$$\Delta u_{id} = -K_1 \Delta i_{id} - p_f \omega_{f0} L_{fd} \Delta i_{fd} \quad (11)$$

同理可得:

$$\Delta u_{iq} = -K_3 \Delta i_{iq} + K_2 K_3 \Delta P_f^* \quad (12)$$

式(12)中含一个新的变量 ΔP_f^* 应给予表达, 由式(7)得:

$$P_f^* s^2 + (\omega_1 + \omega_2) P_f^* s + \omega_1 \omega_2 P_f^* = e_{gd} (\omega_1 - \omega_2) i_{gd} s$$

$$\dot{P}_f^* + (\omega_1 + \omega_2) \dot{P}_f^* + \omega_1 \omega_2 P_f^* = e_{gd} (\omega_1 - \omega_2) \dot{i}_{gd} \quad (13)$$

令 $P_f^* = \alpha$, 则:

$$\Delta \dot{P}_f^* = \Delta \alpha \quad (14)$$

将上式和 i_{gd} 对应的特征方程代入式(13)可得 $\Delta \alpha$ 项对应的特征方程。

在额定风速以下, 发电机有功给定取增量形式可表示为 $\Delta P_e^* = 3k\omega_s^2 \Delta \omega_s$, 将各控制电压的增量形式分别代入其状态方程, 整理后可得:

$$\Delta \dot{i}_{sd} = -R_s \Delta i_{sd} / L_{sd} - p_s \omega_{s0} \Delta i_{sq} - p_s i_{sq0} \Delta \omega_s + M_{s0} \cos \sigma_{s0} \Delta u_{dc} / (2L_{sd})$$

$$\Delta \dot{i}_{sq} = p_s \omega_{s0} \Delta i_{sd} - R_s \Delta i_{sq} / L_{sq} + p_s (i_{sd0} + \psi_s / L_q) \Delta \omega_s + M_{s0} \sin \sigma_{s0} \Delta u_{dc} / (2L_{sq})$$

$$\Delta \dot{\omega} = p_s \psi_f \Delta i_{sq} / J - 2k\omega_{s0} / J$$

$$\Delta \dot{i}_{gd} = -R_g \Delta i_{gd} / L_g + \omega_g \Delta i_{gq} - M_{g0} \cos \sigma_{g0} \Delta u_{dc} / L_g$$

$$\Delta \dot{i}_{gq} = -\omega_g \Delta i_{gd} - R_g \Delta i_{gq} / L_g - M_{g0} \sin \sigma_{g0} \Delta u_{dc} / L_g$$

$$\Delta \dot{i}_{fd} = -(R_f + K_3) \Delta i_{fd} / L_{fd}$$

$$\Delta \dot{i}_{fq} = -(R_f + K_3) \Delta i_{fq} / L_{fq} + K_2 K_3 \Delta P_f^* / L_{fq}$$

$$\Delta \dot{P}_f^* = \Delta \alpha$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\alpha} = & -R_g e_{gd} (\omega_1 - \omega_2) \Delta i_{gd} / L_g + \omega_g e_{gd} (\omega_1 - \omega_2) \Delta i_{gq} - \\ & \omega_1 \omega_2 \Delta P_f^* - (\omega_1 + \omega_2) \Delta \alpha - M_{g0} \cos \sigma_{g0} \times \\ & e_{gd} (\omega_1 - \omega_2) \Delta u_{dc} / (2L_g) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{u}_{dc} = & -M_{s0} \sin \sigma_{s0} \Delta i_{sq} / (2C) + M_{g0} \cos \sigma_{g0} \Delta i_{gd} / (2C) - \Delta \beta \\ \beta = & P_f / (Cu_{dc}) \end{aligned}$$

其中, 下标 0 表示各分量稳态时的值。

3.2 控制系统特征值分析

利用所建立的系统小信号模型, 求解系统的特征值就可分析系统参数变化对系统稳定性的影响。

求解特征值必须先得到系统在稳态工作点的状态, 在额定风速 12.55 m/s 时: $i_{sd0} = 0, i_{sq0} = 1775.1$ A, $i_{gd0} = -1739.6$ A, $i_{gq0} = 0, M_{s0} = 1.06, \sigma_{s0} = -61.88^\circ, M_{g0} = 0.978$, 保持 $V = 12.55$ m/s, $K_2 = 1, K_3 = 1, f_1 = \omega_1 / (2\pi) = 0.2$ Hz, $f_2 = \omega_2 / (2\pi) = 20$ Hz; 直流链电压 1200 V, 直流链电容 40 mF。计算不同的飞轮电机 d 轴电流环比例系数 K_1 所对应的特征根, 如表 1 所示。

通过表 1 可知, K_1 变化时 Δi_{id} 项的特征值发生显著变化, 随着 K_1 增大, 特征值逐渐远离虚轴, 系统稳定性增强。 K_1 在 0~29 范围内取值时, 系统全部特征值均具有负实部, 当其继续增大时系统其他特征值中将出现零值, 此时系统将变得不再稳定。

保持其他参数不变, 通过计算可知, 飞轮功率环比例系数 K_2 变化时系统特征值未发生变化, 即 K_2 变化不影响系统的稳定性能。

保持其他参数不变, 当 K_3 发生变化, 分析可得 Δi_{iq} 所对应的特征值的变化与 K_1 变化时基本相似。

保持风速、比例系数及截止频率 $f_1 = 0.01$ Hz 不变, 当截止频率 f_2 变化时, 计算系统的特征根, 如表 2 所示。

由表 2 可知, 截止频率 f_2 变化时 $\Delta \alpha$ 项的特征值发生变化, 随着 f_2 的增大, 此特征值负实部绝对值增大, 系统稳定性增强。 f_2 取值小于 1600 Hz 时特征根实部均为负, 系统渐近稳定, 继续增大 f_2 , 2 个低通滤波器截止频率的差值将继续增大, 系统特征值中将出现零值, 系统变得不再稳定。

保持其他参数和 $f_2 = 200$ Hz 不变, 计算截止频率 f_1 变化时系统特征根的变化, 如表 3 所示。

截止频率 f_1 和 f_2 的选取对系统平滑性能有重要的影响, 较低的截止频率 f_1 反映电网侧有功功率的平滑度, 为获得较好的平滑效果, f_1 通常取值较小, 但由表 3 可知, 当 f_1 减小时系统 ΔP_f^* 项的特征值发生变化, 特征值实部靠近虚轴, 系统稳定性减弱, 当 f_1 取值过小时系统的特征值还将出现零值, 系统不再稳定, 当 $f_1 > 0.007$ Hz 时系统特征值均具有负实部, 系统才稳定。所以在实际系统中截止频率 f_1 的值不能取得过小, 以免系统稳定性能受到影响。较高截止频率 f_2 反映电网侧有功功率的变化, 由表

表 1 K_1 变化时特征值的变化
Tab.1 Eigenvalues variation when K_1 changes

特征值				
$K_1=0.01$	$K_1=1$	$K_1=10$	$K_1=20$	$K_1=30$
-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10+j100
-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10-j100
-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	0
-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11+j340
-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11-j340
-233.33	-3 533.33	-33 533	-66 867	-100 200
-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533
-1.26	-1.26	-1.26	-1.26	0
-125.66	-125.66	-125.66	-125.66	-125
-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	0

表 2 f_2 变化时特征值的变化
Tab.2 Eigenvalues variation when f_2 changes

特征值				
$f_2=1$ Hz	$f_2=20$ Hz	$f_2=100$ Hz	$f_2=1\ 000$ Hz	$f_2=1\ 600$ Hz
-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40
-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40
-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-3+j3
-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11+j340
-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11-j340
-3 533.33	-3 533.33	-33 533	-3 533.33	-3 533
-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533
-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	0
-6.28	-125.66	-628.32	-6 283.19	-10 053
-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-3-j3

表 3 f_1 变化时特征值的变化
Tab.3 Eigenvalues variation when f_1 changes

特征值				
$f_1=0.007$ Hz	$f_1=0.01$ Hz	$f_1=1$ Hz	$f_1=10$ Hz	$f_1=100$ Hz
-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40	-10.30+j96.40
-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40	-10.30-j96.40
-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72	-2.58+j2.72
-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68	-11.12+j342.68
-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68	-11.12-j342.68
-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33
-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33	-3 533.33
0	-0.06	-6.28	-62.83	-628.32
-1 256.64	-1 256.64	-1 256.64	-1 256.64	-1 256.64
-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72	-2.58-j2.72

2 可知,随 f_2 取值增大,系统稳定性增加,但取值过大系统也将出现不稳定状况,所以在实际系统中 f_2 取值不能太大。

通过上述分析可知,在额定风速时,系统在相关参数大幅度变化下均可保持稳定状态,加入飞轮系统不影响系统稳定运行性能。通过分析系统参数对特征值分布的影响,对飞轮系统参数的设计和选取具有一定的指导作用。

4 仿真分析

为验证所提控制策略的正确性,对一含飞轮储能单元的永磁直驱风力发电系统进行了仿真计算,仿真系统参数如下。

风机参数:空气密度 1.225 kg/m^3 ,风轮半径 30 m ,最优叶尖速比 6.335 ,最大功率系数 0.4382 ,额定风速 12.55 m/s ,发电机、风机总转动惯量 $213\ 600\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

发电机参数:额定功率 1.5 MW ,电机极对数 32 ,额定转速 2.65 rad/s ,定子电阻 $0.006\ \Omega$,定子 d 轴、 q 轴电感 2 mH ,永磁励磁磁通 6.6437 Wb 。

飞轮系统参数:额定功率 150 kW ,电机极对数 2 ,飞轮电机额定转速 $15\ 371\text{ r/min}$,定子电阻 $0.06\ \Omega$,定子 d 轴、 q 轴电感 0.3 mH ,永磁励磁磁通 0.175 Wb ,飞轮电机转动惯量 $0.01\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,飞轮转动惯量 $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

为评估并网风力发电机接入电网有功功率平滑程度,参照文献[17]定义如下的有功功率平滑度

系数:

$$P_{\text{glevel}} = \int_0^t \left| \frac{dP_g}{dt} \right| dt / P_s \quad (15)$$

其中, P_s 为发电机额定功率。 P_{glevel} 越小, 表示输入到电网的有功功率越平滑。

对全风况条件下整个发电系统的运行特性进行了仿真计算, 图 3—11 给出了系统各仿真波形。

图 3 为风速曲线, 风速在 7.5~17 m/s 的范围内波动, 发电机转速跟随风速变化, 在额定风速以下, 发电机实现最大风能跟踪控制, 风能利用系数基本保持在最佳值 0.438 2 附近, 变桨系统不动作。在额定风速以上, 当发电机超速时变桨系统启动, 桨距角迅速增大, 风机风能利用系数大幅下降, 发电机以满功率运行, 如图 5、图 6 和图 11 所示。

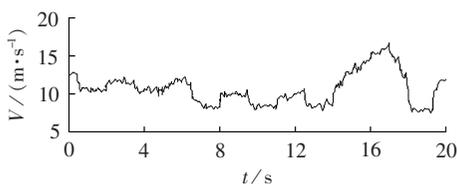


图 3 风速曲线
Fig.3 Curve of wind speed

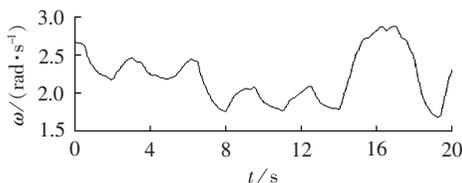


图 4 发电机转速曲线
Fig.4 Curve of generator rotor speed

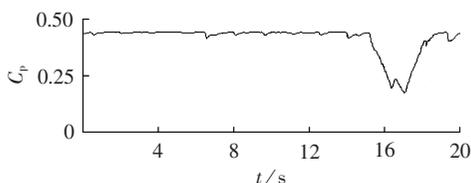


图 5 风能利用效率

Fig.5 Wind energy utilization efficiency

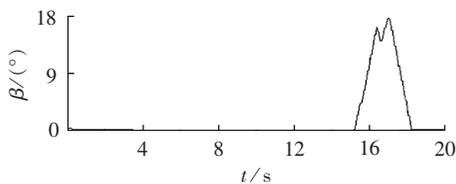


图 6 桨距角变化曲线

Fig.6 Curve of pitch angle variation

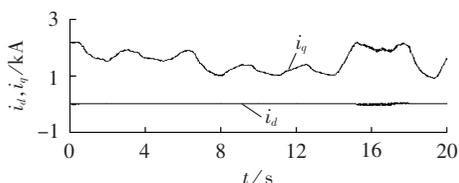


图 7 发电机 d 、 q 轴电流

Fig.7 d -axis and q -axis currents of generator

发电机定子 d 、 q 轴电流如图 7 所示, 采用传统矢量控制方式可实现良好的电流解耦控制。飞轮电机运行曲线如图 8—10 所示, 飞轮系统根据功率平滑需求进行加/减速运行。飞轮电机定子电流 d 轴分量控制在零左右, q 轴电流则根据功率环的调节输出在驱动/制动状态之间变化, 飞轮电机以驱动状态运行时, 吸收发电机输出的多余功率, 飞轮加速储能; 反之, 驱动电机以制动状态运行时, 向电网侧变换器输出补充功率, 飞轮减速释放能量。

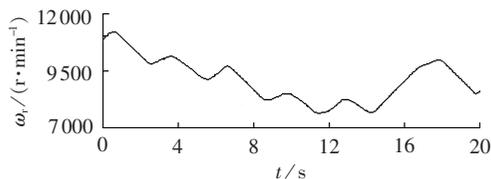


图 8 飞轮转速

Fig.8 Flywheel speed

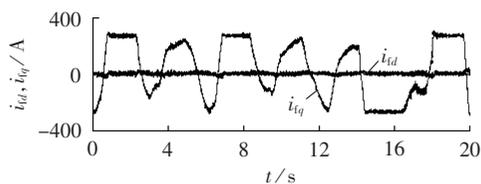


图 9 飞轮电机定子 d 、 q 轴电流

Fig.9 d -axis and q -axis currents of flywheel motor

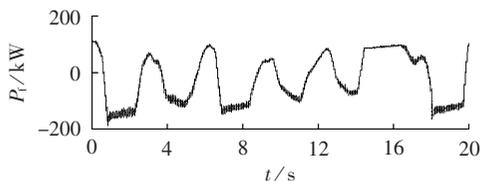


图 10 飞轮电机输出功率

Fig.10 Output power of flywheel motor

图 11 给出了未加飞轮系统(上图)与含飞轮储能系统(下图)的直驱永磁风力发电系统功率平滑效果的仿真对比。由图 11(a)可知, 2 种情况下电机侧变换器输出功率保持一致, 表明含飞轮单元的发电系统中电机侧变换器实现了最大风能捕获, 可最大限度地利用风能。由图 11(b)—(d)可知, 风速变化时电网侧变换器可实现稳定的直流链电压控制, 电流解耦控制效果良好, 在含飞轮单元的系统电网侧变换器 d 轴电流的波动较小, 因此整个系统输出有功功率的波动也得到有效抑制, 在一定程度上可改善系统的并网电能质量。图 11(e)进一步给出了 2 种情况下系统功率平滑程度的对比, 含飞轮储能单元的发电系统输出功率平滑程度更优。当然, 由于飞轮储能单元的容量有限, 使得整个系统输出功率的平滑程度亦有限。

储能单元容量的合理选取是一个受多方面因素影响的重要问题, 容量太小会使得风电系统输

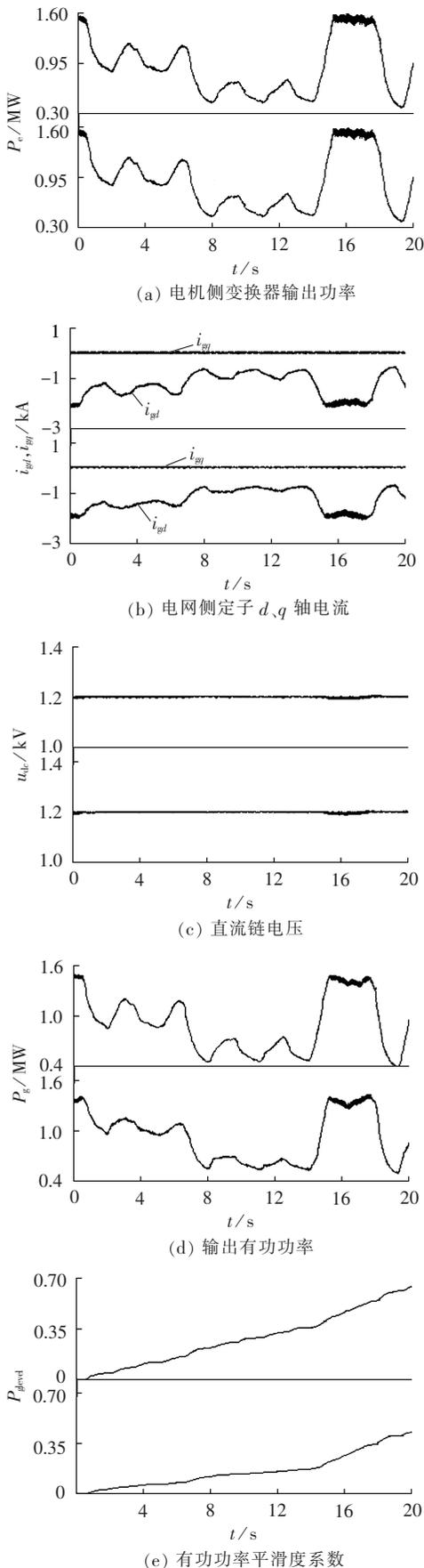


图 11 未加飞轮系统与含飞轮储能系统对比仿真
Fig.11 Simulative results of generation system with and without flywheel energy storage system

出功率的平滑效果不明显,容量过大则会造成不必要的投资。根据文献[18]表 2—4 可知,在不同的风电场输出功率下,储能容量与储能成本成正比,储能容量增加,风电系统输出功率的稳定性和平滑度增加,成本也增加。风电场可能长时间处于无风状况,即使储能容量很大也不会达到绝对的平滑。表中储能成本数据是目前蓄电池储能的平均价格,但其成本随容量变化的规律对其他形式的储能单元同样适用。若采用其他方式储能特别是以永磁同步电机为驱动电机的飞轮储能单元,该费用更高,因此飞轮系统容量的增加将使得成本大幅增大。

图 12 为分别采用 150 kW 和 300 kW 飞轮系统进行储能所得的电网侧功率对比,从图中可知采用储能容量大的飞轮系统的电网侧功率平滑效果更好。储能单元容量的选取受技术因素、投资成本、风力发电机出力预测、风电场在电网中所占比例等多方面因素的影响,应结合各方面因素,合理选取飞轮系统容量,尽量采用较小的储能容量达到较好的平滑效果。一般而言风电场选取安装储能装置的容量为该发电机容量的 10%~20%,即可有效平滑风电机组出力^[19]。

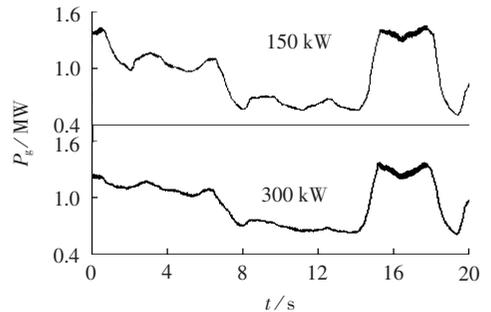


图 12 储能系统不同容量下电网侧有功功率
Fig.12 Grid-side active power for different capacities of energy storage system

采用相同容量的飞轮储能单元,仿真分析本文所提控制策略与利用风速形成功率平滑指令的控制策略,定量比较 2 种控制下电网侧有功功率。

图 13(a)为发电机所发功率 P_e 和利用平均风速计算的平均功率 P_{ss} ,图 13(b)上图为利用 P_{ss} 作为功率平滑指令所得的电网侧功率,下图为通过功率滤波作为功率平滑指令所得的电网侧功率。图 13(b)上图相比于下图平滑效果较差,且实际系统中采集的风速较仿真中平滑指令所利用的风速的精度并不高,由此更可能引起控制系统的不稳定。因此在同等储能容量下与之前的控制策略定量比较,本文提出的控制策略更有助于提高控制的可靠性、准确性和输出功率的稳定性。

由于截止频率 f_1, f_2 对系统输出功率的平滑作用有重要影响,因此对 20 s 内系统取不同截止频率

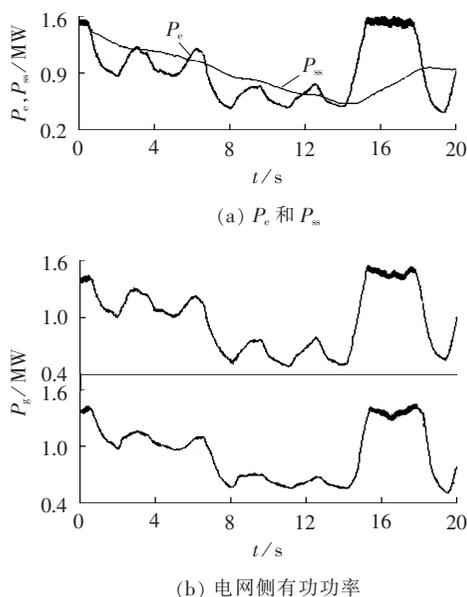


图13 不同控制算法下电网侧有功功率

Fig.13 Grid-side active power for different control algorithms

的情况下进行仿真分析,得到其对应的功率平滑度系数 P_{glevel} 的数值,以分析截止频率相对值与差值对功率平滑系数的影响,为系统截止频率的选取提供重要参考,仿真所得平滑系数数值如表4、表5所示。

表4 f_1 变化、 $f_2=20$ Hz 时功率平滑系数值的变化
Tab.4 P_{glevel} variation when f_1 changes and $f_2=20$ Hz

f_1 /Hz	P_{glevel}	f_1 /Hz	P_{glevel}
0.01	0.605 9	1	0.481 8
0.1	0.453 9	5	0.524 2
0.2	0.423 4	15	0.543 7

表5 f_1 变化、 $f_2=200$ Hz 时功率平滑系数值的变化
Tab.5 P_{glevel} variation when f_1 changes and $f_2=200$ Hz

f_1 /Hz	P_{glevel}	f_1 /Hz	P_{glevel}
15	0.513 0	150	0.622 4
50	0.547 6	175	0.625 9
100	0.611 8		

由表4、表5可知,当较低的截止频率 f_1 取值越小,截止频率的差值越大,系统的功率平滑系数值越小,输入到电网的有功功率越平滑。由表4前2个值可知,在 f_1 取值过小的情况下,系统平滑系数反而较大,这是由于较小的滤波截止频率使得飞轮电机有功功率给定值大于飞轮系统容量,飞轮电机不能发出所需的功率,且影响飞轮电机充/发电状态的切换,不能达到较理想的平滑效果;并且过小的截止频率 f_1 还将影响系统稳定性能,使飞轮系统通过充/放电来平滑电网侧功率的作用失效。由表4最后1个值和表5第1个值可知,在 f_1 相同的情况下, f_2 越大系统的功率平滑系数越小,即 f_1 为定值时截止频率差值越大,输入到电网的有功功率越平滑,但总体而言,较低的截止频率 f_1 对系统的网侧

有功功率平滑系数的影响更大一些。通过分析可知,应该根据飞轮储能系统的容量和实际情况选择滤波截止频率以实现有功功率相对平滑输出。

5 结论

本文在分析传统直驱永磁风力发电系统运行控制的基础上,引入飞轮储能单元来平滑发电系统有功功率的输出。提出一种适用于该系统的功率平滑控制策略,所提控制方案无需测量或估算风速信号,在一定程度上有助于提高系统运行的可靠性。通过对整个系统进行小扰动分析,表明含飞轮储能单元的直驱永磁风力发电系统可保持稳定运行。系统仿真结果表明,利用飞轮储能单元作为直驱永磁风力发电系统的中间能量暂存环节,可在最大限度利用风能的基础上平滑系统输出功率,为进一步提高直驱永磁风力发电系统的并网电能质量以及增强运行稳定性奠定了基础。

参考文献:

- [1] ABO-KHALIL A G, LEE D C. MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1489-1490.
- [2] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风力发电系统变流器拓扑分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 77-81.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis of converter configuration for direct-drive wind power system with PMSG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 77-81.
- [3] DEGHAN S M, MOHAMADIAN M, VARJANI A Y. A new variable-speed wind energy conversion system using permanent-magnet synchronous generator and Z-source inverter[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 714-724.
- [4] 耿华, 杨耕. 变速变桨距风电系统的功率水平控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 130-137.
GENG Hua, YANG Geng. Output power level control of variable-speed variable-pitch wind generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 130-137.
- [5] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 串并联型超级电容器储能系统在风力发电中的应用[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 1-4.
ZHANG Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiang, et al. Application of series-parallel energy storage system with super-capacitor in wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 1-4.
- [6] ALEGRÍA I M, ANDREU J, MARTIN J L, et al. Connection requirements for wind farms: a survey on technical requirements and regulation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(8): 1858-1872.
- [7] 蔺红, 晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1-5.
LIN Hong, CHAO Qin. Simulation and analysis of transient characteristics of grid-connected direct-drive wind power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 1-5.
- [8] 廖勇, 何金波, 姚骏, 等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29

- (18):71-77.
- LIAO Yong, HE Jinbo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18):71-77.
- [9] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Application of STATCOM/BESS for wind power smoothening and hydrogen generation[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79:365-373.
- [10] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15):54-58. ZHANG Buhuan, ZENG Jie, MAO Chengxiong, et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology, 2006, 30(15):54-58.
- [11] 毕大强, 葛宝明, 王文亮, 等. 基于钒电池储能系统的风电场并网功率控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13):72-78. BI Daqiang, GE Baoming, WANG Wenliang, et al. VRB energy storage system based power control of grid-connected wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(13):72-78.
- [12] 张国驹, 唐西胜, 齐智平, 等. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12):85-89. ZHANG Guojun, TANG Xisheng, QI Zhiping, et al. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12):85-89.
- [13] 孙春顺, 王耀南, 李欣然. 飞轮辅助的风力发电系统功率和频率综合控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29):111-116. SUN Chunshun, WANG Yaonan, LI Xinran. Synthesized power and frequency control of wind power generation system assisted through flywheels[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29):111-116.
- [14] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制[J]. 电网技术, 2008, 32(10):11-15. YAO Jun, LIAO Yong, QU Xinghong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines[J]. Power System Technology, 2008, 32(10):11-15.
- [15] 耿华, 许德伟, 吴斌, 等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33):68-75. GENG Hua, XU Dewei, WU Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33):68-75.
- [16] 李军军, 吴政球, 谭勋琼. 下垂特性对直驱永磁风电系统的小扰动稳定影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3):52-59. LI Junjun, WU Zhengqiu, TAN Xunqiong. Droop characteristics effect on small signal stability of directly driven permanent magnet wind power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3):52-59.
- [17] SENJYU T, SAKAMOTO R, URASAKI N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(2):467-475.
- [18] 卢继平, 朱三立, 韩涛, 等. 风电场储能容量合理取值范围分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8):46-51. LU Jiping, ZHU Sanli, HAN Tao, et al. Analysis of reasonable wind farm energy storage capacity range[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8):46-51.
- [19] 贾俊川, 刘晋, 张一工. 集成嵌入式储能的双馈风力发电系统功率控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15):80-86. JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Power control of DFIG based wind power system incorporated with embedded energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15):80-86.

作者简介:

熊倩(1987-),女,重庆人,硕士研究生,主要从事新型电机及其控制的研究(E-mail:517329545@qq.com);

廖勇(1964-),男,四川南充人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电机运行与控制方向的教学和科研工作(E-mail:yongliacqu@vip.sina.com);

姚骏(1979-),男,重庆人,副教授,博士,主要从事新型电机及其控制的研究(E-mail:topyj@163.com)。

Active power smoothing control of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generation system with flywheel energy storage unit

XIONG Qian, LIAO Yong, YAO Jun

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The operating characteristics of traditional direct-driven PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) and the control of FESU (Flywheel Energy Storage Unit) are analyzed and the power smoothing control without wind velocity measurement is proposed for the wind power system. The small signal model of control system is built up and the stability analysis shows the proposed control system maintains the stable operation of power system under the small disturbance conditions. Simulation is carried out for a PMSG system with FESU and results show that the proposed control strategy smoothes effectively the output active power fluctuation while ensures the maximal capture of wind energy.

Key words: wind power; synchronous generators; active power smoothing control; flywheels; small signal analysis; power control; energy storage