

基于逆推滑模的混合传动型风力机并网控制方法

王子威¹,尹文良^{1,2},刘琳³,彭克¹,李军徽²,芮晓明³

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院,山东 淄博 255000;

2. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;

3. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘要:带有差动调速机构的混合传动型风力机可在无需电力电子变频装置条件下,采用同步发电机实现风电的友好并网消纳。为了提高该新型机组的并网运行性能,结合逆推设计与滑模控制理论,提出了一种适用于混合传动型风力机发电单元的逆推滑模励磁控制方法。将扩张状态观测器与所提逆推滑模控制算法相结合,很好地补偿了控制系统中模型参数的不确定性及风轮/电网端扰动的影响;构建了李亚普诺夫判据,证明了控制系统的全局渐近稳定性。搭建了1.5 MW混合传动型风力机的仿真模型及半物理试验平台,并对所提控制方法的控制效果进行了对比验证研究。结果表明,在不同的风速条件及电网故障下,所提逆推滑模励磁控制方法可更好地提升混合传动型风力机的并网运行性能。

关键词:风力发电;混合传动;励磁控制;滑模控制;逆推方法;扩张状态观测器

中图分类号:TM614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202208012

0 引言

并网风力发电作为目前最具规模化开发条件和商业化发展前景的可再生能源利用形式之一,已经成为我国推进新型电力系统建设和完成“双碳”目标的重要技术途径^[1]。为了在提高风能转化效率的同时,减小风力发电对电网的冲击,迄今投运的并网风电机组大多采用专用发电机系统,借助大功率整流-逆变装置,转换由变速发电机所产生的电能,从而实现变速恒频运行^[2-3]。但随着风电产业规模的扩大以及风电在电网中渗透率的增加,现有技术存在的问题日渐凸显,主要包括:大功率电力电子变频设备带来的电压波动与电流谐波,降低了电能质量;低电压穿越(low-voltage ride through, LVRT)能力不足,影响到风电机组与电力系统运行的安全性和稳定性。此外,较高的控制难度、大功率变频设备的制造和维护成本也是亟待解决的技术难题^[4-5]。

在此背景下,一种“带有发电机前端调速装置”的混合传动型风电机组新颖解决方案成为国内外的

研究热点^[6-16]。该方案可省略大功率电力电子变频装置,转而借助功能良好的传动调速系统,通过实时调节主传动链末端输出的转速,实现以相对恒定的转速驱动同步发电机并网发电运行。此类无变频的并网风电系统有望突破现役机组的技术瓶颈,降低风电装备整体的制造成本,同时有效解决风电输出电能质量低、故障穿越能力弱等问题。为了验证混合传动型风电机组并网的可行性和优越性,各国学者(包括笔者所在团队)针对其结构方案与调速原理^[6-7]、机械传动特性^[8-9]、调速控制策略^[10-14]、工程可行性^[15-16]等方面展开了细致的研究。

然而,不稳定的风电注入仍然是“双高”电力系统发展中面临的严峻挑战,还需要一定的理论和试验研究来提高风电机组和电力系统运行的安全性、稳定性、经济性。同步发电机的励磁控制技术可灵活地实现输出电压和功率调节,为进一步改善混合传动型风电系统的暂/稳态并网运行性能提供了有效的技术方案;且作为构建实时调速、恒速驱动无变频风电系统动态设计及协调控制理论体系的核心内容,其对推动该类型风电装备的发展和实际应用进程有重要意义。

文献[17]提出了一种自适应鲁棒励磁控制方法,通过附加控制变量与误差补偿,降低了风电机组传动系统强耦合带来的非线性影响,增强了其在LVRT期间的暂态性能。文献[18]采用预测模糊比例积分微分(proportional integral derivative, PID)励磁控制,结合先进电压跌落检测方法与桨距控制策略,有效提升了电网发生故障时机组的响应速度。文献[19]详细分析了风电机组中励磁系统的控制机理与作用,并通过引入神经网络算法,实现了风速变

收稿日期:2022-02-28;修回日期:2022-05-27

在线出版日期:2022-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52005306);山东省自然科学基金资助项目(ZR2020QE220);东北电力大学现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室开放课题(MPSS2022-02)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52005306), Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2020QE220) and the Open Fund of Key Laboratory of Modern Power Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University)(MPSS2022-02)

化时发电机转速的稳定控制。上述成果验证了励磁控制在改善风电机组并网性能方面的作用和优势,但未充分考虑风力机存在频繁扰动的恶劣工作条件。非线性励磁控制可有效处理含不确定性的系统模型;文献[20]通过设计扩张状态观测器(extended state observer, ESO)对发电机扰动进行补偿,实现了系统的反馈线性化,但由于将系统的非线性因素视作单一扰动信号,导致了部分状态变量信息的浪费;文献[21]将滑模变结构理论与逆推设计方法相结合,并应用自适应算法,提出了一种具备鲁棒稳定能力的励磁控制策略,但由于自适应参数计算复杂,增加了其工程应用难度。

上述成果可较好地应用于传统火力发电机组和水力发电机组。但混合传动型风力机需在恶劣多变的运行环境下保证发电机获得同步于电网频率的输入转速驱动,完成无变频器并网稳定运行,这在一定程度上增加了励磁控制的复杂度。在前期的研究中,笔者团队已针对混合传动型风力机的传动方案和调速控制策略进行了研究,初步验证了此类机组的原理可行性和并网运行优越性^[7,10-12,15-16]。为了进一步缓解风轮和电网端的耦合扰动/故障对混合传动型风电机组调速稳定性、并网输出等运行性能的影响,笔者在完成机组传动链末端转速控制的基础上,提出了一种非线性、强鲁棒同步发电机改进励磁控制方法。该方法充分结合 ESO 与逆推方法各自的优势,利用滑模变结构控制来有效应对风电机组参数和外部扰动的不确定性,同时采用逆推方法保证受扰系统的渐近稳定,并简化了非线性设计过程。在此基础上,构造了 ESO 以实现系统扰动的观测与补偿,并保留系统模型中包含状态变量的非线性部分,降低控制器的实际应用难度。基于专用仿真模型及物理试验平台,对所提励磁控制方法进行了对比验证研究,结果表明:与带有电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)的 PID 励磁控制方法以及带有 ESO 的常规滑模励磁控制方法相比,本文所提方法可在多源耦合扰动下,更好地改善机组出力的波动性,实现发电机输出电压和无功功率的灵活调节,从而进一步提高此类机组的暂/稳态并网运行性能;同时有效地克服了已有控制方法在处理系统确定或不确定性干扰方面的不足。

1 传动原理与数学模型

混合传动型风力机的基本结构如图 1 所示,其主要由风轮、增速齿轮箱、差动调速机构、同步发电机及其励磁系统、变压器、电网等部分组成。基于参数配置优化结果^[7],差动齿轮组中的行星架接收来自风轮的转速和转矩驱动,通过实时控制伺服电动机的转速为齿圈提供调速驱动,使太阳轮转速恒定,

进而实现发电机输出恒频电能。

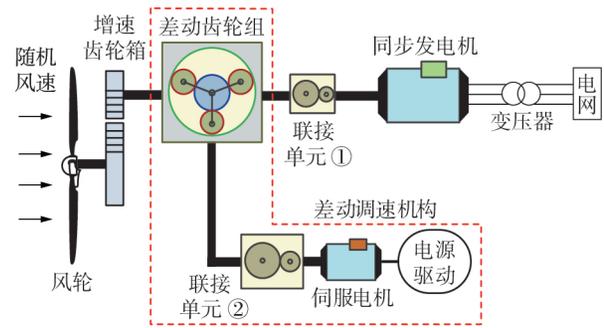


图1 混合传动型风力机的基本结构

Fig.1 Basic structure of hybrid drive wind turbine

1.1 差动齿轮组的传动原理

差动齿轮组各构件的转速关系如图 2 所示,图中 n_c 、 n_s 、 n_R 、 n_p 分别为行星架、太阳轮、齿圈、行星轮的转速。基于已有的参数优化配置方案^[7],在忽略传动误差与损耗的情况下,利用反转法^[9-10]可计算假定轴轮系中太阳轮与齿圈之间的转速比 i_{SR}^c 为:

$$i_{SR}^c = \frac{n_s^c}{n_R^c} = \frac{n_s - n_c}{n_R - n_c} = -k \quad (1)$$

式中: n_s^c 、 n_R^c 分别为太阳轮、齿圈相对于行星架的转速, $n_s^c = n_s - n_c$, $n_R^c = n_R - n_c$; k 为差动轮系的结构参数。

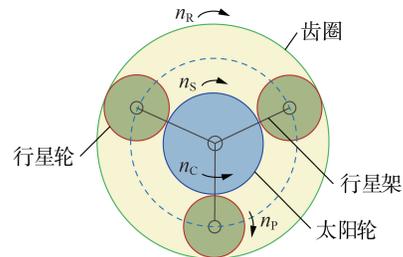


图2 差动齿轮组各构件的转速关系

Fig.2 Speed relationship of components in differential gear train

在优化配置方案中,太阳轮与同步发电机直接相连^[7],将联接单元①的传动比固定为 1。结合式(1),发电机的转速 n_c 可表示为:

$$n_c = n_s = (1+k)n_c - kn_R = (1+k)n_w i_{Cw} - kn_m i_{Rm} \quad (2)$$

式中: n_w 、 n_m 分别为风轮、伺服电机的转速; i_{Cw} 、 i_{Rm} 分别为行星架与风轮、齿圈与伺服电机之间的转速比, $i_{Cw} = n_c/n_w$, $i_{Rm} = n_R/n_m$ 。

由于参数 k 、 i_{Cw} 、 i_{Rm} 仅与机组的传动结构相关,对于确定型号的风力机而言,其均为恒定值。因此,由式(2)可知,通过实时采集 n_w ,并设计先进算法实时调节 n_m ,可使同步发电机获得恒定的输入转速驱动。

1.2 同步发电机的数学模型

为了给后续励磁控制方法的设计提供技术基础,考虑混合传动型风力机的实际运行条件要求,首

先构建同步发电机的三阶数学模型^[20],如式(3)~(5)所示。

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} (P_{in} - P_e) - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) \quad (4)$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T_{d0}} E'_q + \frac{1}{T_{d0}} E_f \quad (5)$$

式中: δ 、 ω 分别为发电机功角、转子转速; ω_0 为发电机的稳态转子转速; P_{in} 、 P_e 分别为发电机调速后输入的机械功率、输出的电磁功率; H 、 D 分别为惯性时间常数、阻尼系数; E_q 、 E'_q 分别为发电机 q 轴电势、 q 轴暂态电势; E_f 为励磁电压; T_{d0} 为发电机定子绕组开路时的励磁绕组时间常数。

采用隐极机模型,发电机输出的电磁功率 P_e 可表示为^[20]:

$$P_e = \frac{E'_q U_s}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (6)$$

式中: U_s 为无穷大母线电压; $x'_{d\Sigma}$ 为计及发电机暂态电抗 x'_d 、变压器电抗 x_T 与线路电抗 x_L 的总暂态电抗,即 $x'_{d\Sigma} = x'_d + x_T + x_L$ 。

2 逆推滑模励磁控制算法设计

以上述传动原理及数学模型为基础,在完成传动链末端转速精确调节的条件下,本节针对混合传动型风力机发电单元,设计了一种带有ESO的逆推滑模励磁控制方法,用于实现机端电压调节时对系统非线性因素和不确定扰动的动态补偿。同时,改善混合传动型风力机发电的波动性问题,进一步提升其并网运行性能,也为实现该新型机组的协调运行控制提供理论及技术支持。

2.1 ESO设计

由于 E_q 难以测量,选择 P_e 作为新的状态变量。对式(6)进行求导,并结合式(3)~(5),可得:

$$\dot{P}_e = \frac{U_s E'_q (\omega - \omega_0) \cos \delta}{x'_{d\Sigma}} - \frac{U_s E_q \sin \delta}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} + \frac{U_s E_f \sin \delta}{x'_{d\Sigma} T_{d0}} \quad (7)$$

为了简化逆推设计,进行如下坐标变换:

$$\begin{cases} x_1 = H\delta \\ x_2 = H(\omega - \omega_0) \\ x_3 = -\omega_0 P_e \end{cases} \quad (8)$$

因此,原三阶系统模型可改写为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \omega_0 P_{in} - \frac{D}{H} x_2 + x_3 \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{H} x_2 x_3 \cot \frac{x_1}{H} + b_0 u + d(x, t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} b_0 = \frac{\omega_0 U_s}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} \sin \delta_0 \\ d(x, t) = \frac{\omega_0 U_s E_q}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{\omega_0 U_s}{T_{d0} x'_{d\Sigma}} (\sin \delta + \sin \delta_0) E_f \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u = E_f$ 为控制变量; δ_0 为该时刻发电机的稳态功角; b_0 为系统的控制常数; $d(x, t)$ 为系统扰动。

为了提高整体的控制精度,应尽可能保留式(9)中含系统状态变量的部分,将 $d(x, t)$ 视为系统扰动,可构造如式(11)所示二阶ESO对其进行实时观测。

$$\begin{cases} e = m_1 - x_3 \\ \dot{m}_1 = m_2 - \beta_1 \text{fal}(e, \gamma_1, \xi) + \frac{x_2 x_3}{H} \cot \frac{x_1}{H} + b_0 u \\ \dot{m}_2 = -\beta_2 \text{fal}(e, \gamma_2, \xi) \end{cases} \quad (11)$$

式中: e 为系统输出误差; m_1 、 m_2 分别为 x_3 、 $d(x, t)$ 的估计值; β_1 、 β_2 为ESO的带宽参数,其取值范围相对宽裕; γ_1 、 γ_2 为观测误差指数的变化参数, ξ 为ESO线性区间的长度,三者的取值通常为1组固定的常值,且均在(0, 1)之间^[22];fal(\cdot)为非线性函数,表达式见式(12)。

$$\text{fal}(e, \gamma, \xi) = \begin{cases} e/\xi^{\gamma-1} & |e| \leq \xi \\ |e|^\gamma \text{sign}(e) & |e| > \xi \end{cases} \quad (12)$$

式中:sign(\cdot)为符号函数。

2.2 逆推滑模控制器设计

按照逆推滑模的设计原理,对于式(9)所示三阶非线性系统而言,其可分3步分别构建李亚普诺夫函数并得到最终的控制律。

设计虚拟状态变量 $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]$ 为:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - x_{1d} \\ z_2 = x_2 - \alpha_1 \\ z_3 = x_3 - \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: x_{1d} 为发电机功角跟踪值; α_1 、 α_2 为使各子系统稳定的虚拟控制量。

1)定义 $V_1 = z_1^2/2$,结合式(13)可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 \dot{x}_1 = z_1 x_2 = z_1 z_2 + z_1 \alpha_1 \quad (14)$$

令 $\alpha_1 = -c_1 z_1$,且设 $c_1 > 0$,可得:

$$\dot{V}_1 = z_1 (-c_1 z_1 + z_2) = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (15)$$

当 $z_2 = 0$ 时,有 $\dot{V}_1 \leq 0$ 成立。

2)定义 $V_2 = V_1 + z_2^2/2$,结合式(15)可得:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2 \quad (16)$$

式中: $\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = \omega_0 P_{in} - Dx_2/H + x_3 - \dot{\alpha}_1$ 。

令 $\alpha_2 = -z_1 - c_2 z_2 - (\omega_0 P_{in} - Dx_2/H - \dot{\alpha}_1)$,且设定 $c_2 > 0$,联立式(13)和式(16),可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (-z_1 - c_2 z_2 + x_3 - \alpha_2) = \\ & -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 (-z_1 - c_2 z_2 + z_3) = \\ & -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 \end{aligned} \quad (17)$$

分析可知,当 $z_3 = 0$ 时, $\dot{V}_2 \leq 0$ 成立。

3)为了保证差动调速机构与励磁系统控制目标的一致性,选取滑模面函数为:

$$s = K z_2 + z_3 \quad (18)$$

式中: K 为控制器的系数参数。

为了保证当 s 较大时,系统状态能以较快的速度

到达滑模面,并尽可能减小抖振,选择指数趋近律为:

$$\dot{s} = -\varepsilon_1 (s + \varepsilon_2 \text{sat}(s)) \quad (19)$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\Delta & |s| \leq \Delta \\ \text{sign}(s) & |s| > \Delta \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 均为大于0的常数; $\text{sat}(s)$ 为饱和函数; Δ 为边界层大小。

设 $V_3 = V_2 + s^2/2$,联立式(17)、(19)、(20),可得:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + s\dot{s} = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 + s\dot{s} = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 - \varepsilon_1 s^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 s \text{sat}(s) \quad (21)$$

定义常数矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 + \varepsilon_1 K^2 & \varepsilon_1 K - 0.5 \\ 0 & \varepsilon_1 K - 0.5 & \varepsilon_1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

计算可得:

$$zQz^T = [z_1 \ z_2 \ z_3] \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 + \varepsilon_1 K^2 & \varepsilon_1 K - 0.5 \\ 0 & \varepsilon_1 K - 0.5 & \varepsilon_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = c_1 z_1^2 + c_2 z_2^2 + \varepsilon_1 (Kz_2 + z_3)^2 - z_2 z_3 = c_1 z_1^2 + c_2 z_2^2 - z_2 z_3 + \varepsilon_1 s^2 \quad (23)$$

将式(23)代入式(21),可计算得到 \dot{V}_3 为:

$$\dot{V}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + z_2 z_3 - \varepsilon_1 s^2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 s \text{sat}(s) = -zQz^T - \varepsilon_1 \varepsilon_2 s \text{sat}(s) \quad (24)$$

分析式(22)可知,当参数 ε_1, K, c_2 满足 $\varepsilon_1(c_2 + K) - 0.25 > 0$ 时, $|Q| > 0$,即 Q 为正定矩阵。

同时,由式(20)可知:

$$s \text{sat}(s) = \begin{cases} s^2/\Delta & |s| \leq \Delta \\ |s| & |s| > \Delta \end{cases} \quad (25)$$

即有 $s \text{sat}(s) \geq 0$ 恒成立。因此,有:

$$\dot{V}_3 = -zQz^T - \varepsilon_1 \varepsilon_2 s \text{sat}(s) \leq 0 \quad (26)$$

基于上述分析可知,系统在遭受扰动后可渐近稳定,最终收敛。结合式(9)、(13)、(19)可计算逆推滑模励磁控制律 u 为:

$$u = \frac{1}{b_0} \left[-K\dot{z}_2 - m_2 - \frac{1}{H} x_2 x_3 \cot \frac{x_1}{H} + \dot{\alpha}_2 - \varepsilon_1 (s + \varepsilon_2 \text{sat}(s)) \right] \quad (27)$$

3 性能验证与结果分析

3.1 仿真模型的试验验证及参数设定

混合传动型风力机需要同步发电机从太阳轮接收恒定转速,进而产生恒频电能输送至电网。而在传动系统数学模型及仿真模型的建立过程中,为了简化设计过程,并未充分考虑齿轮啮合误差、轴系扭转变形等因素对调速精度的影响。本节基于附录A图A1所示试验平台,按照文献[7]中的参数整定方法验证仿真模型的可用性。试验平台主要设备的型号见附录A表A1,为了保证试验验证的有效性,仿真模型按照试验平台的实际参数搭建。设风力机的额定风速为 11.7 m/s ,为了充分揭示差动调速系统

的传动特性,同时保证验证结果的有效性,利用FAST软件生成平均风速为 $10, 13, 21 \text{ m/s}$ 的正常湍流模型作为仿真及试验的输入,风速及对应的风轮转速曲线分别如附录A图A2和图A3所示。

试验中:传感器实时采集各轴转矩与转速信号,并传输给控制单元;伺服电机1从工控机接收模拟风速信号,产生系统的主输入;伺服电机2从驱动控制器接收控制信号,产生调速输入。差动齿轮组通过整合主输入及调速输入,调节太阳轮的转速至恒定。设定同步发电机的理想转速为 300 r/min ,仿真及试验时长均为 100 s ,得到3种正常湍流风速条件下,仿真模型和试验平台测得的发电机输入转速(仿真值和试验值)如图3所示。由图可以看出:进入稳态后,试验平台与仿真模型中发电机输入转速均维持在 300 r/min 左右,仿真误差与试验波动均在 5 r/min 以内,即最大误差仅为 1.67% ;结果验证了传动系统模型的有效性与精确性,为后续励磁控制方法的性能验证提供了有力的保障。

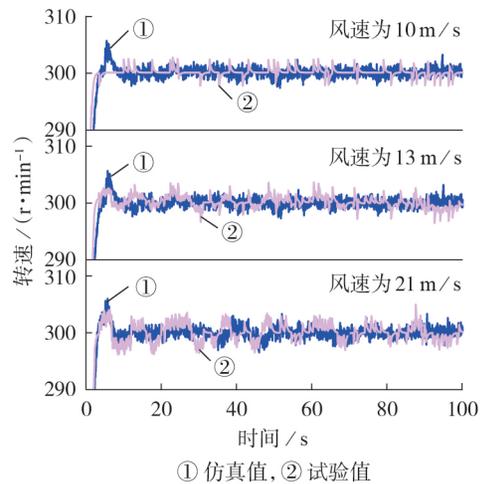


图3 不同正常湍流风速下发电机输入转速

Fig.3 Generator input speeds under different normal turbulent wind speeds

基于试验结果,按照相同的方法搭建 1.5 MW 混合传动型风力机并网专用仿真模型,其中调速电机转速控制采用文献[11]中的方法。利用该专用仿真模型,对比验证采用本文所提逆推滑模励磁控制方法(本文方法)、带有PSS的PID励磁控制方法(方法1)、带有ESO的常规滑模励磁控制方法(方法2)时机组的并网运行性能。相关参数设定如下:发电机的 $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$, $H = 3.2 \text{ s}$, $D = 0.1$, $T_{a0} = 4.5 \text{ s}$, $U_s = 1.06 \text{ p.u.}$, $x'_d = 1.81 \text{ p.u.}$, $x_T = 0.16 \text{ p.u.}$, $x_L = 0.263 \text{ p.u.}$;逆推滑模控制器的 $K = 2$, $c_1 = 0.5$, $c_2 = 1.5$, $\varepsilon_1 = 5$, $\varepsilon_2 = 0.01$;ESO的 $\gamma_1 = 0.5$, $\gamma_2 = 0.25$, $\beta_1 = 1500$, $\beta_2 = 50$, $\xi = 0.1$ 。

3.2 极端相干阵风下的对比验证与分析

一般而言,风速的随机性与间歇性会使风力机捕获的功率产生波动,经过传动系统向后传递,进而

造成发电机输入机械功率的波动,这一问题在极端相干阵风风速影响下尤为突出。为了验证发电机输入机械功率波动情况下本文方法的控制性能,采用极端相干阵风模型作为输入,得到上述3种不同励磁控制方法下发电机功角、转速、有功功率的响应曲线,如图4所示。图中,转速、有功功率均为标么值。

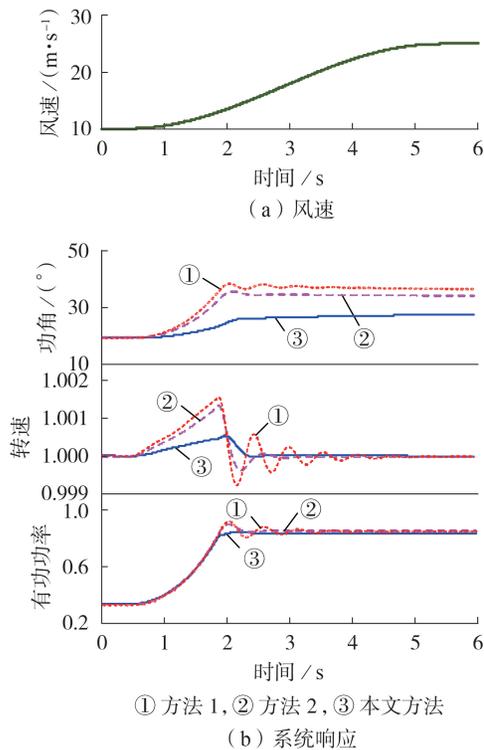


图4 极端相干阵风下的系统响应

Fig.4 System responses under extreme coherent gust

由图4(b)可以看出,风力机在极端相干阵风造成机械功率突增的情况下,当采用本文方法时:发电机功角偏离幅度最小,且恢复过程无明显振荡;转速的最大瞬时值由方法1的1.0015 p.u.降为1.0004 p.u.,恢复时间由方法1的3.1 s、方法2的1.8 s降为0.85 s;有功功率的最大瞬时值由方法1的0.93 p.u.降为0.85 p.u.,恢复时间由方法1的2.1 s、方法2的1.2 s降为0.7 s。上述结果表明本文方法能保证新型机组具有最佳的并网运行性能。

3.3 电网电压故障下的对比验证与分析

以新能源为主体的新型电力系统对风电机组的LVRT能力提出了更高的技术要求。为了验证本文所提励磁控制方法在提升机组LVRT能力方面的优越性,采用如附录A图A2所示的10 m/s正常湍流风速模型为输入,并考虑电网实际故障的发生特点,在变压器高压侧分别发生三相对称及单相接地短路故障时,对比验证3种控制方法下混合传动型风力机的并网运行性能。

发生三相对称故障(并网电压跌落至额定值

的20%,故障在发生0.3 s后切除)时发电机功角、机端电压、无功功率响应曲线如图5所示。图中,机端电压、无功功率均为标么值,后同。由图可以看出:在湍流的干扰下,发电机各状态变量均有不同程度的波动;但由于混合传动型风力机的特殊传动及发电原理,采用3种励磁控制方法后机组均可在故障期间向电网提供一定的无功功率,以支持电网电压恢复。其中,本文方法和方法2下的无功功率与机端电压响应相近,且其在故障切除后的恢复时间均比方法1减少了1.8 s左右。但本文方法下的功角波动幅值较小,且回稳过程中的振荡时间约为方法2的50%及方法1的30%。

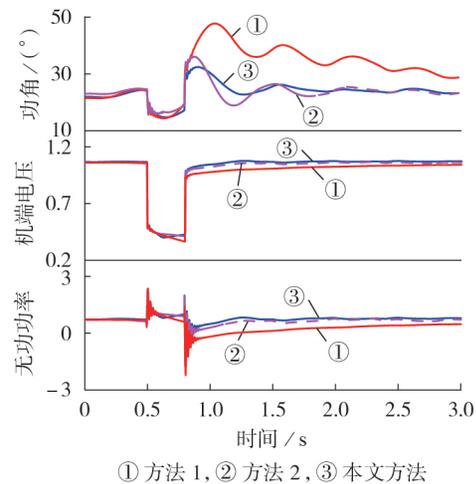


图5 发生三相对称故障时的系统响应

Fig.5 System responses when occurring three-phase symmetric fault

而当变压器高压侧发生单相接地短路故障(并网电压跌落至额定值的50%,故障在发生0.625 s后切除)时,发电机功角、机端电压、无功功率的响应曲线如图6所示。由图可以看出:当发生单相接地

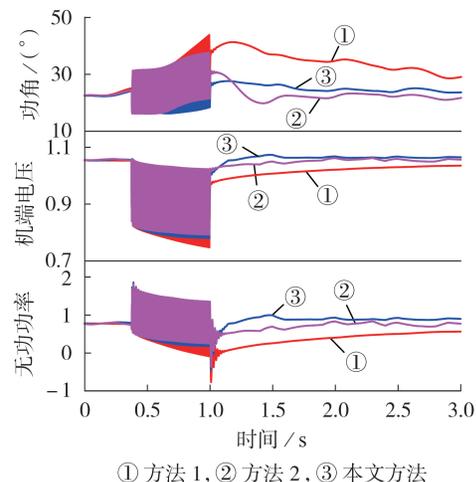


图6 发生单相接地短路故障时的系统响应

Fig.6 System responses when occurring single-phase grounding short circuit fault

短路故障时,3种励磁方法下机组均可实现连续并网运行,且相较于方法2,采用本文方法时混合传动型风力机能在故障切除后迅速地提高励磁水平,使机端电压与无功功率分别提升0.017 p.u.和0.5 p.u.左右;相较于方法1,本文方法能将机端电压与无功功率分别提升0.042 p.u.和0.68 p.u.左右。可见,当采用本文方法时,发电机各关键指标可在最小的振动幅值下更快地恢复到稳态,机组在电压跌落期间的并网性能得到了有效提升。

4 结论

为了进一步提升混合传动型风力机的并网运行性能,本文针对混合传动型风力机发电单元提出了一种带有ESO的逆推滑模励磁控制方法,试验和仿真结果验证了所提方法在缓解机组出力波动、保证其连续并网运行稳定性方面的有效性及优越性,所得主要结论如下。

1)试验平台验证了仿真建模方法的精确性。对比验证结果表明,在相同的运行条件下,试验平台和仿真模型所得发电机驱动转速均可很好地稳定在理想值附近,仿真值误差不大于1.67%。

2)所提逆推滑模励磁控制方法能很好地应对系统参数不确定、风速波动、电网端故障等不利因素带来的影响,有效保证混合传动型风力机并入电力系统持续稳定运行。与带有PSS的PID励磁控制方法、带有ESO的常规滑模控制方法相比,本文所提方法充分利用了逆推设计的渐近稳定性,在改善混合传动型风力机在多工况下的暂/稳态运行性能,尤其是在维持发电机功角、机端电压稳定方面更具有优势。

研究结果验证了本文所提励磁控制方法应用于混合传动型风力机的可行性及优越性,对有效推进机械调速类混合传动风电系统的实际应用具有重要的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李庆民,于万水,赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术,2021,47(9):3047-3060.
LI Qingmin, YU Wanshui, ZHAO Jiyao. Key technologies for the safe operation of wind and solar power generation equipment in support of the “peak CO₂ emissions and carbon neutrality” policy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3047-3060.
- [2] 张文娟,马浩森,张飞鸽,等. 基于模糊切换的DFIG转子串联双动态电阻LVRT优化控制[J]. 电力自动化设备,2021,41(7):58-64.
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, ZHANG Feige, et al. LVRT optimal control of DFIG using rotor series double dynamic resistance based on fuzzy switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 58-64.
- [3] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [4] 薛安成,付潇宇,乔登科,等. 风电参与的电力系统次同步振荡机理研究综述和展望[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):118-128.
XUE Ancheng, FU Xiaoyu, QIAO Dengke, et al. Review and prospect of research on sub-synchronous oscillation mechanism for power system with wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 118-128.
- [5] 王传坤,何怡刚,王晨苑,等. 计及疲劳损伤的多时间尺度风电变流器IGBT可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):173-178.
WANG Chuankun, HE Yigang, WANG Chenyuan, et al. Multi-time scale reliability evaluation of wind power converter IGBT considering fatigue damage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 173-178.
- [6] LIN Y G, TU L, LIU H W, et al. Hybrid power transmission technology in a wind turbine generation system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(3): 1218-1225.
- [7] YIN W L, DONG Z Y, LIU L, et al. Self-stabilising speed regulating differential mechanism for continuously variable speed wind power generation system[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(15): 3002-3009.
- [8] JELASKA D, PODRUG S, PERKUŠIĆ M. A novel hybrid transmission for variable speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 78-84.
- [9] SU R, RUI X M, WU X, et al. The design and analysis of wind turbine based on differential speed regulation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(2): 221-229.
- [10] 芮晓明,尹文良,武鑫,等. 网端负载波动时混合传动风电系统的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3809-3815.
RUI Xiaoming, YIN Wenliang, WU Xin, et al. The control strategy of hybrid drive wind power generation system during load fluctuation in the grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3809-3815.
- [11] YIN W L, WU X, RUI X M. Adaptive robust backstepping control of the speed regulating differential mechanism for wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1311-1318.
- [12] RUI X M, YIN W L, DONG Y X, et al. Fractional-order sliding mode control for hybrid drive wind power generation system with disturbances in the grid[J]. Wind Energy, 2019, 22(1): 49-64.
- [13] YIN X X, LIN Y G, LI W. Operating modes and control strategy for megawatt-scale hydro-viscous transmission-based continuously variable speed wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1553-1564.
- [14] LI X Q, DONG H Y, LI H W, et al. Optimization control of Front-End Speed Regulation (FESR) wind turbine based on improved NSGA-II[J]. IEEE Access, 2019, 7: 45583-45593.
- [15] YIN W L, RUI X M, LIU L, et al. Operating performance analysis on wind turbines with the speed regulating differential mechanism[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10(6): 063301.
- [16] 尹文良,刘琳,张存山,等. 含制氢储能的混合传动风电系统建模与运行特性分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):64-70.

- YIN Wenliang, LIU Lin, ZHANG Cunshan, et al. Modeling and operation performance analysis of hybrid drive wind power generation system with hydrogen energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 64-70.
- [17] DONG H Y, CHEN N N, LI X Q, et al. Improved adaptive robust control for low voltage ride-through of front-end speed regulation wind turbine[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 55438-55446.
- [18] 魏占宏. 前端调速式风电机组低电压穿越控制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
WEI Zhanhong. Research on low voltage ride-through control of front-end speed-regulating wind turbine[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.
- [19] 李凤婷. 电励磁同步风力发电机无刷励磁控制策略的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
LI Fengting. Research on brushless excitation control strategy of electrical excited synchronous wind generator[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2012.
- [20] 李天云, 朱建华, 袁明哲, 等. 基于微分同胚映射和扩张状态观测器的鲁棒励磁控制器设计[J]. *电网技术*, 2012, 36(2): 131-135.
LI Tianyun, ZHU Jianhua, YUAN Mingzhe, et al. Design of a robust excitation controller based on differential homeomorphic mapping and extended state observer[J]. *Power System Technology*, 2012, 36(2): 131-135.
- [21] 余向阳, 南海鹏, 余娟, 等. 自适应积分逆推滑模励磁控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(10): 74-77.
YU Xiangyang, NAN Haipeng, YU Juan, et al. Adaptive integral backstepping sliding mode generator excitation control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(10): 74-77.

- [22] 张海生. 基于微分几何法的改进型非线性励磁控制的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
ZHANG Haisheng. Improved nonlinear excitation control research based on differential geometry[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

作者简介:



王子威

王子威(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为风力发电并网运行控制(**E-mail**: 20404010482@stumail.sdut.edu.cn);

尹文良(1991—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为新能源发电技术与装备以及风电制氢储能系统(**E-mail**: yinwenliang@sdut.edu.cn);

刘琳(1994—),女,博士研究生,主要研究方向为风电设备故障监测与运行优化(**E-mail**: liulinmasterstd@163.com);

彭克(1983—),男,副教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为交直流配电系统与综合能源系统(**E-mail**: pengke@sdut.edu.cn);

李军徽(1976—),男,教授,博士,主要研究方向为新能源发电并网运行关键技术以及储能技术应用(**E-mail**: lijunhui@neepu.edu.cn);

芮晓明(1955—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为风力发电技术与设备、电站设备节能与优化(**E-mail**: rxm@ncepu.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Grid-connected control method of hybrid drive wind turbine based on backstepping sliding mode

WANG Ziwei¹, YIN Wenliang^{1,2}, LIU Lin³, PENG Ke¹, LI Junhui², RUI Xiaoming³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Key Laboratory of Modern Power Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

3. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The hybrid drive wind turbine (HDWT) equipped with the speed regulating differential mechanism is able to employ synchronous generator to achieve friendly grid-connected consumption of wind power without power electronic frequency conversion devices. In order to further improve the grid-connected operation performance of the new type HDWT, combined with the backstepping design method and sliding mode control theory, a backstepping sliding mode excitation control method suitable for the HDWT generating unit is proposed. By combining the extended state observer with the proposed backstepping sliding mode control theory, the undesired influences of model parameter uncertainty in the control system and the disturbances from wind wheel and grid sides can all be well-compensated. The Lyapunov criterion is constructed and the global asymptotic stability of the control system is proved. The simulation model and semi-physical test platform of a 1.5 MW HDWT are built, and the control effect of the proposed control method is compared and verified. The results show that under different wind speed conditions and grid faults, the proposed backstepping sliding mode excitation control method can better improve the grid-connected operation performance of HDWT.

Key words: wind power generation; hybrid drive; excitation control; sliding mode control; backstepping method; extended state observer

附录 A

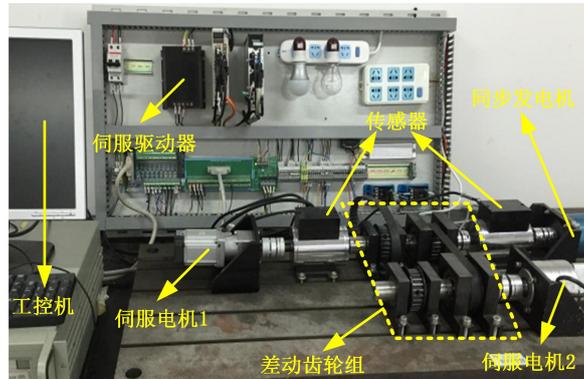
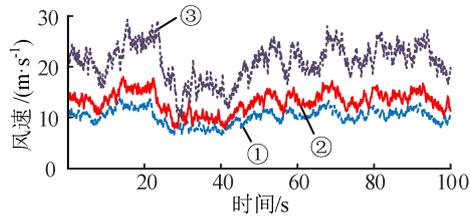


图 A1 试验平台原型与设备
Fig.A1 Prototype and equipment of experimental platform

表 A1 试验平台主要设备型号
Table A1 Key equipment model numbers of experimental platform

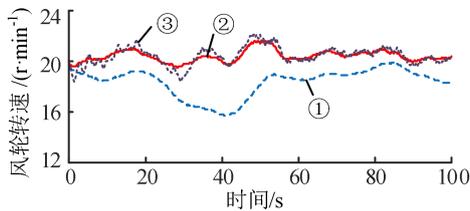
设备名称	型号
差动齿轮组	PLS40-3
伺服驱动器	Yasukawa SGD V-2R88101A
伺服电机	Yasukawa SGMJV-02ADD6S
同步发电机	90TDY-300
传感器	GB-DTS10
同步带轮	GT-ATP24L075



① 平均风速为10 m/s, ② 平均风速为13 m/s
③ 平均风速为21 m/s

图 A2 风速模型

Fig.A2 Wind speed models



① 平均风速为10 m/s, ② 平均风速为13 m/s
③ 平均风速为21 m/s

图 A3 风轮转速模型

Fig.A3 Wind rotor speed models