

限制转子电流的双馈风电机组虚拟同步控制策略*

霍现旭¹, 陈培育¹, 徐科², 丁一¹, 吴莉萍¹, 李秉昀³, 杨秦敏³

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;

2. 国网天津市电力公司, 天津 300310;

3. 浙江大学控制科学与工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 随着新能源的大规模开发利用, 其在能源结构中的占比不断提高。为了维持大电网的平稳运行, 要求双馈风机等新能源机组参与电网调频。双馈风机的转子侧变流器存在容量限制, 而调频过程中转子电流变化可能会超出此限。为应对这一问题, 首先分析了双馈风力发电机的数学模型, 并得出了额定转速下 dq 系的转子电流控制模型; 然后使用误差转化函数与李雅普诺夫方法, 设计了限制转子电流的控制器, 并与常规的虚拟同步控制相结合, 提出了一种改进的虚拟同步控制策略, 可以兼顾风机调频的需求与调频动态过程中转子电流的限制。通过仿真验证了所提出控制器参与电网调频的能力以及对于转子电流的良好控制。

关键词: 双馈风机; 转子侧变流器; 虚拟同步控制; 转子电流; 保性能控制

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)09-0083-06

Rotor Current Performance-Guaranteed Virtual Synchronous Control for Doubly-Fed Induction Generators *

HUO Xianxu¹, CHEN Peiyu¹, XU Ke², DING Yi¹, WU Liping¹, LI Bingyun³, YANG Qinmin³

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Tianjin Electric Company, Tianjin 300384, China;

2. State Grid Tianjin Electric Company, Tianjin 300310, China;

3. College of Control Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: With the rapid development and high penetration of renewable energy, it is becoming more important that renewable generators, including doubly-fed induction generator (DFIG), participate in the frequency regulation of the power grid. However, the rotor-side converter (RSC) of DFIGs usually had relatively small current limitations, which could be exceeded during frequency regulation. A novel rotor current performance-guaranteed virtual synchronous controller for DFIGs was proposed. Firstly, the DFIG model was analyzed and a current control model was developed. Then, using an error transformation function and Lyapunov synthesis, a performance-guaranteed controller was proposed to strictly guarantee the rotor current within the predefined bounds. Thus the proposed controller could well deal with the frequency regulation demand and the current limitation. Finally, the effectiveness of the controller was verified via simulations. The enhanced rotor current control effect brought by performance-guaranteed control was also examined.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); rotor-side converter (RSC); virtual synchronous control; rotor current; performance-guaranteed control

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61673347); 国网天津市电力公司科技项目(SGTJDK00DWJS170040)

作者简介: 霍现旭(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网与检测技术、电力电子化电力系统、智能配用电技术。

杨秦敏(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为自适应控制理论、新能源技术(风力发电)、智能电网。

0 引言

随着风能、太阳能等新能源的大规模开发利用,新能源机组的发电量在电网中的占比呈逐年增长的态势。传统矢量控制策略下的新能源发电机组响应极快,没有惯性,因此不能为电网提供必要的有功功率和频率支撑,也无法为微电网提供必要的阻尼作用。在新能源发电占比较高的情况下,这些缺点将严重影响电网的稳定性^[1-2]。

虚拟同步控制策略是一种针对变流器的控制策略,通过内嵌同步发电机的数学模型,模拟同步发电机的惯性、阻尼等机械特性和定转子电感、互感等电磁特性,使并网变流器可以像同步电机那样参与电网的有功功率和频率调节,从而增大电网的总惯量,增强电网的稳定性^[3-8]。

在风力发电机中,由于桨叶和发电机的转子具有与同步发电机相当的惯性时间常数,因此可以将它们的动能进行合理利用,参与电网的一次调频,改善系统频率稳定性^[9-10]。已有文献提出在双馈风机上应用虚拟同步控制策略的方法,并进行了详细的稳定性分析^[11-13]。

双馈风机转子直接与变流器连接,该变流器存在容量限制,所能承受的最大电流较小。当风机采用虚拟同步控制策略时,在调频过程中,或故障状况下,动态电流可能将超出界限,导致风机切出。因此,将虚拟同步控制策略应用于双馈风机时,应将转子电流的物理限制纳入考虑^[2,12]。虚拟电阻方法^[7-8]是一种有效的限流方法,但会减缓无功环响应速度,恶化无功控制性能,且无法限制极端状况下(如故障时)的电流。

针对这一挑战,本文将面向参与电网调频的双馈风力发电机组,设计一种基于保性能控制理论的虚拟同步控制方法,在提供所需调频能力的同时,保证转子电流不超过设定的物理限制。其中,保性能控制理论针对输出受限的非线性系统,通过将受限的输出误差转化为不受限的中间变量,针对转化后的不受限系统设计先进控制方法,使闭环系统达到有界稳定,并严格保证动态过程中的受限输出不超出预先人为设定的上下界^[14-15]。

1 双馈风力发电机的数学模型

本研究的控制目标之一是保证转子电流的动

态性能,因此需要考察转子电流与其他变量的关系,建立1个转子电流的动态模型。为了发挥虚拟同步控制结构简单、不需要锁相环的优势,不能采用磁链或电压定向方法建模,以避免在控制器中引入电网频率测量。因此,本文选择借助恒速 dq 坐标系下的双馈风力发电机模型^[16],建立转子电流的控制模型。 dq 坐标系的转速选取为电网的额定频率50 Hz,定子和转子均采用电动机惯例。

双馈风力发电机的模型由以下4部分构成。

(1) 电压方程为

$$u_{sd} = \frac{d}{dt}\psi_{sd} - \psi_{sq} + R_s i_{sd} \quad (1)$$

$$u_{sq} = \frac{d}{dt}\psi_{sq} + \psi_{sd} + R_s i_{sq} \quad (2)$$

$$u_{rd} = \frac{d}{dt}\psi_{rd} + (\omega_r - 1)\psi_{rq} + R_r i_{rd} \quad (3)$$

$$u_{rq} = \frac{d}{dt}\psi_{rq} - (\omega_r - 1)\psi_{rd} + R_r i_{rq} \quad (4)$$

(2) 磁链方程为

$$\psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \quad (5)$$

$$\psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \quad (6)$$

$$\psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \quad (7)$$

$$\psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \quad (8)$$

(3) 转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (9)$$

(4) 运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d}{dt}\omega_r \quad (10)$$

式中: ψ ——磁链;

u ——电压;

i ——电流;

R ——电阻;

L_r 、 L_s 、 L_m ——转子自感、定子自感、互感;

ω_r ——转子转速;

T_e 、 T_L ——电磁转矩、机械转矩;

J ——桨叶与转子的惯量;

下标 r 、 s 、 d 、 q ——转子侧、定子侧、 d 轴分量、 q 轴分量。

对磁链方程进行求导,并结合电压方程,可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{sc} \frac{d}{dt} i_{rd} = -R_r i_{rd} + (L_{sc} - \omega_r L_r) i_{rq} + u_{rd} - \\ \quad \frac{L_m}{L_s} u_{sd} - \omega_r L_m i_{sq} \\ L_{sc} \frac{d}{dt} i_{rq} = -R_r i_{rq} + (\omega_r L_r - L_{sc}) i_{rd} + u_{rq} - \\ \quad \frac{L_m}{L_s} u_{sq} + \omega_r L_m i_{sd} \end{array} \right. \quad (11)$$

其中, $L_{sc} = L_r - L_m^2/L_s$ 。

式(11)构成了转子电流的动态模型, 其中, 转子电流 i_{rd} 、 i_{rq} 为状态变量, 转子电压 u_{rd} 、 u_{rq} 为控制输入, 定子电压 u_{sd} 、 u_{sq} , 定子电流 i_{sd} 、 i_{sq} 及转子转速 ω_r 为可测量的干扰变量。

2 保转子电流性能的虚拟同步控制

本文提出的控制策略主要包括 3 部分: 有功环路的虚拟同步控制、无功/电压环路的控制及内环保转子电流性能控制。控制器的整体结构是串级控制, 如图 1 所示。

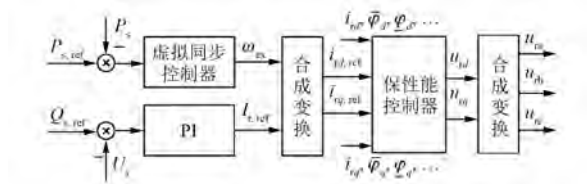


图 1 控制器的整体结构

2.1 有功环路的虚拟同步控制

有功环路控制器的输入为定子电磁功率 P_s 与其设定值 $P_{s,ref}$ 的偏差信号, 输出为转子励磁电压的角频率。此环路采用虚拟同步控制策略, 不需要对电网频率进行测量, 避免了锁相环的不利影响。

同步发电机的机械特性可近似表示为

$$P_m - P_e = J \frac{d}{dt} \omega + D(\omega - \omega_1) \quad (12)$$

式中: ω_1 ——电网实际频率。

虚拟同步控制器的控制规律设计为

$$J_v \frac{d}{dt} \omega_{ex} = P_{s,ref} - P_s - D_v(\omega_{ex} - \omega_0) \quad (13)$$

式中: $P_{s,ref}$ ——定子电磁功率的设定值;

ω_{ex} ——转子励磁电流相对于静止坐标系

的角频率;

ω_0 ——电网的额定角频率;

J_v 、 D_v ——虚拟惯量与虚拟阻尼。

有功环路控制器框图如图 2 所示。

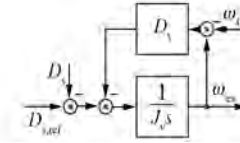


图 2 有功环虚拟同步控制器结构

定子电磁功率的设定值由基于风速测量的最大功率点跟踪 (Maximum Power Point Tracking, MPPT) 策略直接给出。

2.2 无功/电压环路的控制

无功/电压环路控制器的输入为无功功率 Q_s 的偏差信号或定子端电压幅值 U_s 的偏差信号, 输出为转子励磁电流幅值的设定值 $I_{r,ref}$ 。控制策略选用带有低通滤波器的 PI 控制, 并整定其参数使负载突变时不产生超调, 防止动态过程中转子电流设定值超限。

2.3 内环保转子电流性能控制

内环电流控制器需要基于额定转速 dq 坐标系而设计。因此, 需要先将有功、无功 2 个环路的控制输出 ω_{ex} 、 $I_{r,ref}$ 转化为 dq 轴的电流设定值 $i_{rd,ref}$ 、 $i_{rq,ref}$ 。

内环检测输入信号的偏差, 并依据设定的偏差上下界, 将其转化为不受限的中间变量; 然后通过所设计的控制策略控制该中间变量达到有界稳定, 从而保证动态过程中转子电流与设定值的偏差始终处于设定的上下界之内。下文以 d 轴电流为例详述内环控制器的设计过程。

2.3.1 模型转化

首先将受限的转子电流误差转化为不受限的中间变量。定义 d 轴电流误差为

$$e_d = i_{rd} - i_{rd,ref} \quad (14)$$

同时记误差的上下界为 $\bar{\varphi}_d$ 、 $\underline{\varphi}_d$, 即要求 $\underline{\varphi}_d < e_d < \bar{\varphi}_d$, 则利用误差转化函数:

$$s_d = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\bar{\varphi}_d}{\underline{\varphi}_d} \cdot \frac{e_d - \underline{\varphi}_d}{e_d - \bar{\varphi}_d} \right) + e_d \quad (15)$$

将受限的转子电流误差 e_d 转化为不受限的中间变量 s_d 。误差转化函数如图 3 所示。

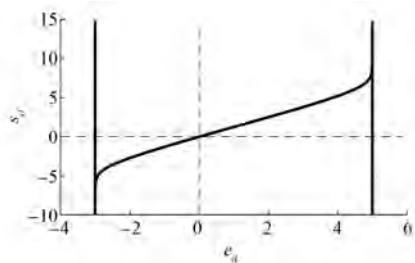


图3 误差转化函数

对 s_d 求导,可得转化后的系统模型为

$$\dot{s}_d = P_d + R_d \dot{i}_{rd,ref}$$

(16)

其中:

$$P_d = \frac{e_d}{2\bar{\varphi}_d(e_d - \bar{\varphi}_d)} \dot{\bar{\varphi}}_d - \frac{e_d}{2\varphi_d(e_d - \varphi_d)} \dot{\varphi}_d - \frac{R_d \dot{i}_{rd,ref}}{\bar{\varphi}_d - \varphi_d}$$

(17)

$$R_d = \frac{\bar{\varphi}_d - \varphi_d}{2(e_d - \varphi_d)(\bar{\varphi}_d - e_d)} + 1$$

(18)

2.3.2 控制器设计

针对控制系统模型式(16)~式(18),利用李雅普诺夫方法设计控制器。首先,设计李雅普诺夫函数:

$$V_d = \frac{1}{2}s_d^2$$

(19)

对其求导可得:

$$\dot{V}_d = s_d \dot{s}_d = s_d(P_d + R_d \dot{i}_{rd,ref})$$

(20)

若设计控制规律为

$$u_{rd} = -k_d s_d + R_r i_{rd} - (L_{sc} - \omega_r L_r) i_{rq} + \frac{L_m}{L_s} u_{sd} + \omega_r L_m i_{sq} - \frac{P_d L_{sc}}{R_d}$$

(21)

其中, k_d 为控制器参数,取>0的常数,则有:

$$\dot{V}_d = -k_d s_d^2 \frac{R_d}{L_{sc}}$$

(22)

依据式(18),有 $R_d > 0$,因此有 $\dot{V}_d < 0$ 。根据李雅普诺夫稳定性条件,所设计的控制器能够使内环电流环满足有界稳定的要求。

类似地,可得:

$$u_{rq} = -k_q s_q + R_r i_{rq} + (L_{sc} - \omega_r L_r) i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} u_{sq} - \omega_r L_m i_{sd} - \frac{P_q L_{sc}}{R_q}$$

(23)

其中, k_q 为控制器参数,取>0的常数。

式(21)和式(23)一起,构成了无功环路内环

电流控制器的表达式,从而完成整个控制器的设计。

3 仿真实验

为了验证本文提出的控制策略的可行性和有效性,本文使用 MATLAB/Simulink 平台及其 Simscape/Power Systems 工具箱搭建了仿真模型,并在不同场景下进行了仿真验证。双馈风机参数如表1所示。控制器参数如表2所示,其中, f_s 为采样频率。

表1 双馈风机参数

参数名称	参数值/p.u.	参数名称	参数值/p.u.
R_s	0.023	L_r	3.06
R_r	0.016	L_m	2.90
L_s	3.080	J	6.00

虚拟同步控制器中,虚拟惯性 J_v 和虚拟阻尼系数 D_v 的选取参考文献[7],模拟同步发电机的特性。PI 控制器中,参数 k_p 、 k_i 的选取应使转子电流幅值设定值 $I_{r,ref}$ 的变化尽可能平缓并抑制超调。保性能控制器中,比例参数 k_d 、 k_q 应选较大值,以保证内环的快速响应;界限 φ_d 、 φ_q 、 $\bar{\varphi}_d$ 、 $\bar{\varphi}_q$ 应选得足够小,以免正常运行时转子电流上界 $I_{r,ref} + \sqrt{\bar{\varphi}_d^2 + \bar{\varphi}_q^2}$ 显著超出转子侧变流器的容量限制,从而失去保性能的意义。频率 f_s 的选取应考虑控制器计算能力的限制。

表2 控制器参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
J_v /p.u.	6	k_p	0
D_v /p.u.	80	k_i	0.1
f_s /kHz	1	k_d 、 k_q	10
φ_d 、 φ_q /p.u.	-0.05	$\bar{\varphi}_d$ 、 $\bar{\varphi}_q$ /p.u.	0.05

3.1 虚拟同步控制效果

仿真使用短路比约为 2.5 的恒压源模拟真实电网。双馈风力发电机与电网连接,并接有额定有功功率 0.3 p.u.、额定无功功率 0.1 p.u. 的本地负载,如图4所示。无功/电压环路的被控变量选为机端电压。仿真通过对如下2个事件的模拟来考察本文提出的控制器参与电网有功功率调节的效果:(1) 令电网频率从 50.00 Hz 增大到

50.02 Hz; (2) 令本地负载发生 0.5 p.u. 的突增。

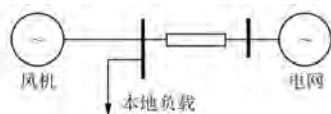


图4 仿真验证系统

风速在 10 m/s 的基准值上加入了 ± 3 m/s 的噪声,以模拟实际运行场景。风机采用基于风速测量的 MPPT 策略。

图 5 所示为突变事件下风机的变量波形。电网频率改变时,在虚拟同步控制器的作用下,输出有功功率随即减小,并在 MPPT 策略的作用下,最终稳定到原稳态值,如图 5(a) 所示。当本地负载发生 0.5 p.u. 的突增时,输出有功功率、转子转速和励磁频率即发生变化,如图 5(b)、图 5(c) 所示,说明风机参与了电网的有功调节。

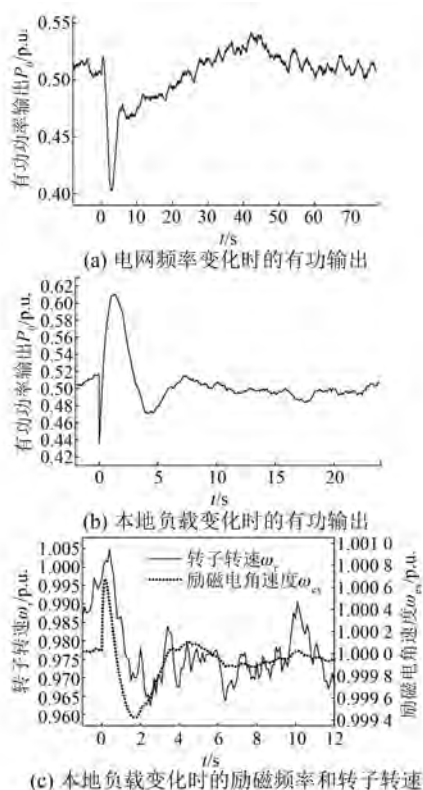


图5 突变事件下风机的变量波形

从图 5(b) 和图 5(c) 可以看出,当负载突增后,输出有功功率在一个冲击后几乎立即发生显著的升高,以部分满足负载对有功功率的需求。在此过程中,风速可近似认为不变,依据能量守恒,超发的有功功率只能来源于转子储存的动能,

因此转子转速有一个显著的下降。在 MPPT 策略的作用下,转子转速和有功输出逐渐恢复至原稳态值,此时负载增加的有功需求完全由电网满足。

对于图 5(a),当风机的有功功率输出降低时,捕获风能的一部分转化为转子动能,转子转速会相应地升高。

在实际运行中,若风力发电机参与电网有功调节,则电网中其他机组的有功出力曲线可以更加平缓,电网的稳定性得以提高。

3.2 无功/电压环与保性能控制的电流跟踪效果

本节考察第 3.1 节负载突增事件的仿真中,无功/电压环与保性能控制器对于转子电流的跟踪控制效果。负载突变时,电网频率设定为 50.02 Hz。

图 6 所示为负载突变时的信号波形。负载突增后,转子电流幅值设定值缓慢上升至新稳态值,且没有超调,如图 6(a) 所示。由于无功/电压环采取机端电压控制,故新的稳态下,风机的无功输出与原稳态值不同,从而电流稳态值也会不同。此外,由于电网频率与 dq 系转速(即额定频率)之间存在微小差异,转子电流 dq 分量的设定值会

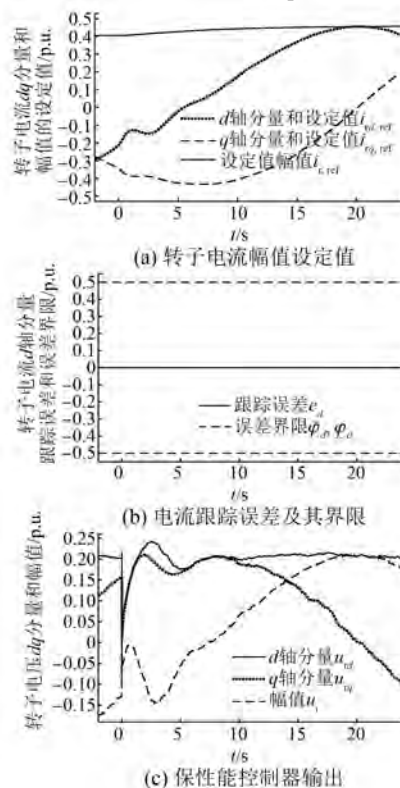


图6 负载突变时的信号波形

呈现为缓慢的正弦曲线。

由于保性能控制器响应极快,且内环控制系统达到了渐近稳定,故动态过程中,即使在足够小的界限下,电流跟踪误差也不超出界限,即达到了保性能的效果,如图 6(b)所示。

内环控制器的输出(即转子电压)在一个可接受的冲击后,较快达到了稳定,如图 6(c)所示。

仿真结果表明:本文所设计的控制器对转子电流具有良好的控制效果。

3.3 无功环与保性能控制的故障电流抑制效果

由于本文提出的控制器采用电流-电压串级控制的结构,且能够保证动态过程中转子电流不超出设定的上下界,所以相较于采用串联虚拟电阻的虚拟同步控制^[7-8],其在低电压故障时对故障电流的抑制能力应当更强。

仿真使用的系统同上,电网频率为 50 Hz,电压幅值为 1 p.u.。本地负载额定有功功率为 0.3 p.u.,额定无功功率为 0.1 p.u.。在 $t=0$ s 时,电网发生一个持续时间 0.5 s、跌落幅度为 100% 的电压跌落事件。

图 7 所示为本文提出的控制策略与虚拟电阻虚拟同步控制策略在该故障情况下的转子电流波形比较。相较于采用虚拟电阻的限流方法,采取本文所提控制策略之后,风机的转子电流最大值得到显著减小,且波形显著平滑。本文所提控制器在限制瞬时电流方面取得了良好的效果,具有更好的低电压穿越潜力。

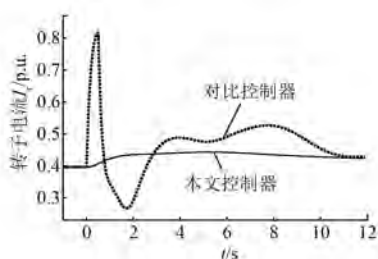


图 7 两控制器的故障转子电流

4 结 语

本文提出了一种保转子电流性能的双馈风力发电机虚拟同步控制技术,并通过仿真验证了所提控制策略参与电网有功调节、限制转子动态电流的能力。保性能控制能够从数学上严格保证转子电流误差不出界限,与无功/电压控制构成串级结构,可

以对转子电流进行良好控制,提升系统可靠性。

本文仅针对单台风机 MPPT 段的控制进行了验证。在过渡区和高风速段的保性能变桨控制策略是一个有价值的研究方向;多台风机的协同控制也很值得进一步研究。

【参 考 文 献】

- [1] ZHONG Q C. Virtual synchronous machines: a unified interface for grid integration[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(4): 18-27.
- [2] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [3] BECK H, HESSE R. Virtual synchronous machine [C] // 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007: 1-6.
- [4] ZHONG Q C, WEISS G. Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy [C] // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009: 1-6.
- [5] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [6] 李浩然, 杨旭红. 基于虚拟同步发电机的离网型三相逆变器控制研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(12): 43-49.
- [7] 占伟强, 吴振兴, 邢鹏翔, 等. 虚拟同步发电机及其在独立型微电网中的应用[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 14-27.
- [8] 杨旭红, 薛冰. 基于模糊控制的虚拟同步发电机并网策略研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(11): 38-49.
- [9] 徐力, 王刚, 侍乔明, 等. 直驱永磁风力发电机组的通用平均模型及在虚拟惯量控制中的应用[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 54-62.
- [10] 胡旭, 边晓燕, 周歧斌, 等. 基于 VSC-HVDC 并网风电场的系统调频综合控制[J]. 现代电力, 2017, 34(6): 53-58.
- [11] ZHAO Y Y, CHAI J Y, SUN X D. Virtual synchronous control of grid-connected DFIG-based wind turbines [C] // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015: 2980-2983.

(下转第 96 页)

(3) 通过理论分析和仿真验证得出, GSC 的电流控制内环 PI 控制器比例系数 K_{p6} 越大, SSO 模态的特征值实部越小, 振荡频率越低, 系统越趋于稳定; GSC 的电压控制外环 PI 控制器积分系数 K_{i5} 越大, SSO 模态的特征值实部越大, 振荡频率在一定范围内越高, 系统越趋于不稳定。

【参考文献】

- [1] 2012年中国风电装机容量统计[R].北京: 中国风能协会, 2012.
- [2] 国家能源局. 风电发展“十二五”规划[A]. 2012.
- [3] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- [4] 宋瑞华, 郭剑波, 李柏青, 等. 基于输入导纳的直驱风电次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4662-4670.
- [5] 刘为杰, 姜建国. 直驱永磁同步风电机组次同步振荡建模与分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 97-103.
- [6] 刘严, 袁越, 傅质馨. 直驱永磁风电场并网运行的小干扰稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 1-6.
- [7] CHOUKET M, KRICHEN L. Small signal modeling and stability analysis of wind turbine with PMSG connected to the grid [C]//International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, IEEE, 2015: 1-8.
- [8] 谭瑾, 王晓茹, 陈哲. 并网永磁直驱式风电系统的模态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013(17): 49-55.
- [9] LIU H, XIE X, HE J, et al. Subsynchronous

interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.

- [10] 彭谦, 马晨光, 杨雪梅, 等. 线性模态分析中的参与因子与贡献因子[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 92-96.
- [11] 张艳萍. 受端系统小扰动电压稳定问题的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [12] 武志刚, 张尧, 郑风雷, 等. 电力系统特征值与状态变量对应关系分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 23-26.
- [13] 蔺红, 晁勤. 直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 145-151.
- [14] 关宏亮. 大规模风电场接入电力系统的小干扰稳定性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [15] 蔺红. 直驱式风电场动态等值建模研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [16] SHI L B, SU J L, YAO L Z. SS resonance analysis of complex power system incorporating wind power[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(3): 305-312.
- [17] JIN Z, WU Q. Using power-law degree distribution to accelerate PageRank [J]. Computer Engineering & Applications Journal, 2012, 1(1): 63-70.
- [18] 伍济开. 含风电场的电力系统频率稳定的同伦函数分析法[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [19] 刘红. 同伦方法求解广义特征值问题[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008.
- [20] BI T, LI J, ZHANG P, et al. Study on response characteristics of grid-side converter controller of PMSG to sub-synchronous frequency component[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(7): 966-972.

收稿日期: 2018-03-12

(上接第 88 页)

- [12] WANG S, HU J B, YUAN X M. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4): 932-944.
- [13] WANG S, HU J B, YUAN X M. On inertial dynamics of virtual-synchronous-controlled DFIG-based wind turbines [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1691-1702.
- [14] MENG W C, YANG Q M, SUN Y X. Adaptive neural control of nonlinear MIMO systems with time-varying

output constraints [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 26(5): 1074-1085.

- [15] MENG W C, YANG Q M, SUN Y X. Guaranteed performance control of DFIG variable-speed wind turbines [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 2215-2223.
- [16] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

收稿日期: 2018-03-26