

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802171

基于虚拟同步控制的双馈式风机组并网 控制策略的仿真分析

韩江北 刘志坚

(昆明理工大学 电力工程学院 昆明 650093)

摘要: 针对双馈式风电机组经出口逆变器并网时缺乏惯性和阻尼会导致电网稳定性受到冲击的问题,首先简述了基于虚拟同步控制的双馈式风机整体控制策略;然后分别介绍了整体控制策略中的转子侧和网侧逆变器的控制策略,并搭建了含网侧虚拟同步控制的双馈式风机组模型;最终针对电网的故障工况及不同运行风速,通过 MATLAB/Simulink 对该模型进行仿真分析,与原始的双馈式风机模型仿真结果进行对比。验证了含网侧虚拟同步控制的双馈式风机比采用传统控制策略的双馈式风机组具有更优异的调节特性。

关键词: 双馈式风电机组;逆变器并网;电网稳定性;虚拟同步控制;MATLAB/Simulink 仿真

中图分类号: TN830 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 120.30

Simulation analysis of grid connected control strategy of doubly fed wind turbine based on virtual synchronization control

Han Jiangbei Liu Zhijian

(School of Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to solve the problem that the stability of the power grid will be affected by the lack of inertia and damping when the double fed wind turbine is connected to the outlet inverter, this paper first describes the whole control strategy of the doubly fed fan based on the virtual synchronous control. Then the control strategies of the rotor-side inverter and the grid-side inverter in the overall control strategy are introduced respectively, and the double-fed fan unit model with grid-side VSG control is built. Finally, the simulation analysis of the model is carried out through MATLAB/Simulink for the fault condition and different running wind speed of the power grid, and the simulation results of the original double fed fan model are compared and analyzed. It is verified that the double-fed fan with grid-side VSG control has better regulation characteristics than the double-fed fan.

Keywords: doubly fed wind turbine; inverter grid connection; power grid stability; virtual synchronization control; MATLAB/Simulink simulation

0 引言

随着经济社会的发展,传统化石能源已日渐匮乏,发展新能源已经成为不可回避的趋势^[1]。而新能源发电需要通过逆变器接入电网,由于风力发电出力的随机性和不确定性,缺乏惯性和阻尼的并网逆变器将会对电网造成很大的冲击。为改善逆变器并网的稳定性,国内外学者相继提出将虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制^[2-4]引入风电机组并网逆变器中,来补偿风机组运行时所缺乏的惯性和阻尼。文献[5]主要将储能元件配置于风电机组来模拟虚拟同步机的惯性,

将电压型 VSG 应用在储能单元的逆变器上。通过模型仿真分析了在不同风速下 VSG 控制系统对功率振荡的调节效果,以及频率调节所起到的作用。此种方法只分析了对功率和频率的调节,没有分析 VSG 在电压无功调节中所起到的作用。文献[6]主要将惯性和阻尼引入网侧变流器。将 VSG 的转子方程引入转子控制系统中。通过该方式实现双馈风电机组的虚拟同步控制。并在此基础上通过仿真分析,对比风电机组的传统控制,突出了在弱电网的运行中,采用虚拟同步控制具有更为明显的优势。文献[7]搭建了含储能单元的 VSG 控制器,当负荷波动时验证了该控制器可以维持频率的

稳定。文献[8]在转子侧变流器控制中引入 VSG 的转子方程,网侧逆变器的惯性和阻尼通过网侧的 VSG 中的转子运动方程来提供,仿真分析后,得出 VSG 控制在弱电网的运行中相比传统控制方法有更明显的电压稳定性。本文首先通过测量单元测得的参数值带入搭建的虚拟同步控制单元,该虚拟同步控制单元中包含励磁控制器和调速器分别实现了无功、有功调节。调速器所得到的机械功率与测量得到的电磁功率代入转子运动方程,该转子运动方程为系统提供惯性和阻尼^[9-10]。通过电压调节输出为 $dq0$ 坐标下的电压值,将该值代入原双馈式风机的网侧控制系统,经过仿真计算,验证了在电压跌落及风速改变的工况下可以实现无功及有功功率的调节,且调节速度和效果均优于传统的双馈式调节。

1 含 VSG 的双馈式风机控制策略

由图 1 所示的双馈式风机整体控制框图可知,测量单元在网侧测量可得到电网侧电流 I_{abc} ,频率值 f ,有功、无功功率的测量值 $P_{\text{meas}}, Q_{\text{meas}}$,励磁电压 V_{rms} 。

将测量单元中的测量值代入 VSG 控制单元,实现频率的一次调节和励磁控制。并在其中加入同步机的运动方程使得网侧逆变器具有同步机的特性,相当于为逆变器提供了惯性和阻尼,使得逆变器运行的更为稳定。随后进入网侧控制单元,在正常运行工况下,该单元可以实现稳定电容电压,保证逆变器交流侧以单位功率因数运行的作用。转

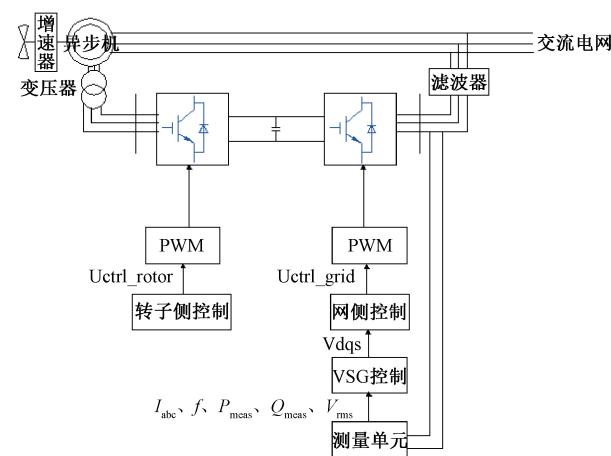


图 1 双馈风机整体控制框图

子侧控制利用对转子 d 轴和 q 轴电流的控制,从而实现对转速的追踪和电压的调节,进而实现对有功功率和无功功率的独立调控。定子侧及转子侧的控制最终都会进入 PWM 环节,并将输出电压的波形与三角载波比较产生 SPWM 脉冲来控制 IGBT 的通断。从而通过调节两侧逆变器来控制系统的运行状态。

转子侧逆变器控制框图如图 2 所示,通过对转子电流 d 轴分量的控制,可以实现对转速的调节,从而实现对双馈式风机有功功率的有效控制。通过对转子电流 q 轴分量的控制,可以实现对双馈式风机无功功率的有效控制。

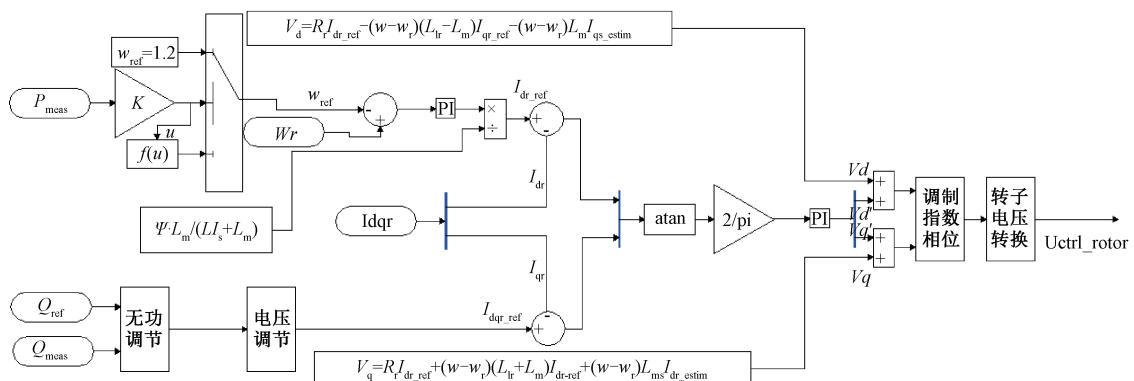


图 2 转子侧逆变器控制框图

如图 3 所示,直流母线电压的参考值在模型中的取值为 1 150 V。通过直流母线电压的差值经过比例积分调节后得到定子 d 轴方向上的电流参考值。在测量单元中测得频率 Freq_Hz 带入调速器中与给定的频率值(本模型中取 60 Hz)作差后经过 PI 调节器以实现频率的一次调节。测量单元中测得的无功功率和励磁电压值带入励磁控制单元,实现了对系统电压稳定和无功功率平衡的控制。将测量得到的电磁功率和网侧的三相电流以及经过调速器

控制输出的机械功率和励磁控制单元得到的电势带入虚拟同步控制单元,该虚拟同步控制单元主要模拟了同步机的工作特性,为网侧逆变器提供了虚拟的惯性和阻尼^[11-13]。最终得到经过 VSG 调节后的 $dq0$ 坐标下的定子侧电压值,将该值作为网侧电压的一部分,从而使仿真结果表现出了 VSG 的调节性能。

从电网侧逆变器的控制框图可以得出,电网侧逆变器为了使电网侧变换器交流侧以单位功率因数运行,网侧电

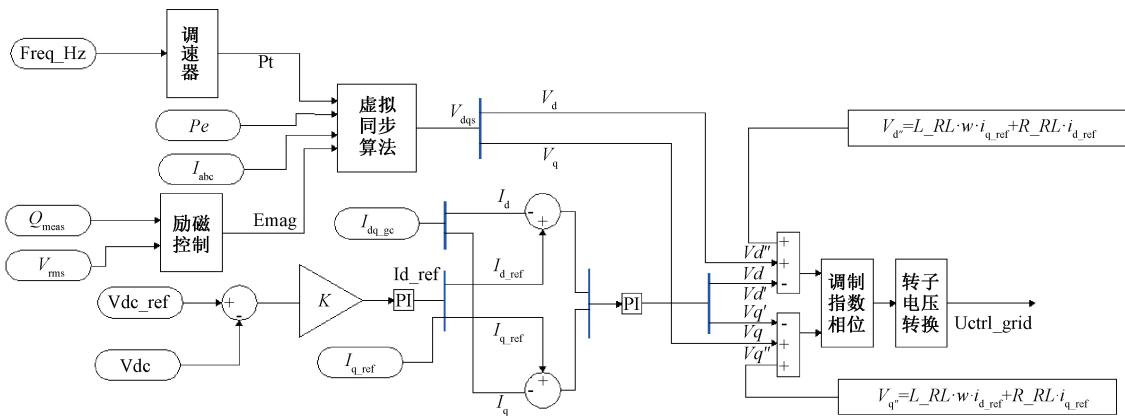


图3 电网侧逆变器控制框图

流 q 轴分量的参考值取值为 0。通过对网侧电流 d 轴电流的控制来实现保持直流母线电容电压恒定的控制。

2 VSG 控制部分 MATLAB/Simulink 仿真模型搭建

2.1 调速器模块

如图 4 所示,该模块为频率-有功功率调节模块。模仿同步发电机的频率下垂调节特性,公式为:

$$(f_{ref} - f) \frac{1}{R} + P_n = P_t \quad (1)$$

式中: f_{ref} 和 f 分别为频率的给定值和实际测量值, 经过 PI 调节器之后与额定功率相加得到调节后机械功率。此处频率给定值为 60 Hz, 而 P_n 和 P_t 分别为风机组的额定功率和输出的机械功率, 根据题设已知为 6 台 1.5 MW 的风机接入系统, 将总容量为 9 MW 代入 P_t 中。

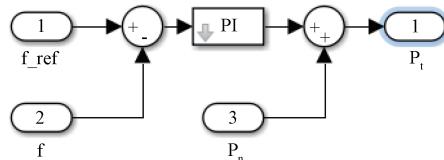


图4 调速器的 MATLAB/Simulink 仿真

频率有功调节模块模拟了同步发电机的调频特性, 引入下垂系数控制, 当电网频率 f 发生改变时, 可以实现迅速调节有功功率使频率维持在 60 Hz 左右, 综上, 频率调节的方法就是调节有功功率, 而改变有功功率方法就是改变输出的机械转矩。

2.2 励磁控制模块

如图 5 所示,该模块为电压-无功功率调节模块, 模拟同步发电机的电压调节特性,公式为:

$$U_{ref} = (Q_{ref} - Q)K + U_n \quad (2)$$

式中: U_n 为额定电压; K 为电压下垂系数, 取值为 10; Q_{ref} 、 Q 分别为给定和输出无功, 通过无功电压下垂关系可以得到 VSG 电压参考值 U_{ref} 。根据给定的 U_{ref} 值和输出值

U_m , 通过 PI 控制器, 得到的 E_{mag} 为电压无功模块所输出的最终电势。

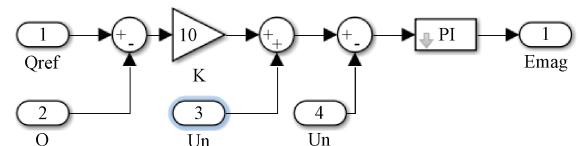


图5 励磁控制的 MATLAB/Simulink 仿真

2.3 虚拟同步算法模块

如图 6 所示,该模块模拟仿真了同步机的转子特性以及将逆变器的寄生电阻等效为同步发电机的电枢电阻, 将逆变器的电感 L 等效为同步机的电感, 同时加入了网侧的电压控制环节。公式如下:

$$V_{abc}(pu) = E_{mag} \sin\left(\theta \pm \frac{2}{3}\pi\right) - I_{abc}Z \quad (3)$$

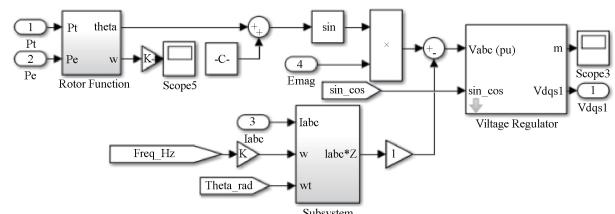


图6 虚拟同步算法的 MATLAB/Simulink 模块

2.4 转子功能模块

图 7 所示模块对应公式为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_t}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} - D(\omega - \omega_g) \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (5)$$

本模块为模拟同步发电机转子特性的模块。对于同步发电机, J 为转动惯量; P_t 和 P_e 分别为机械功率和电磁功率; ω_n 为电角速度; ω_g 为电网电角速度的阻尼系数。

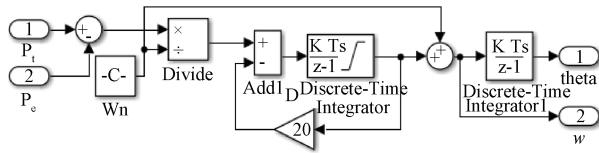


图 7 转子功能的 MATLAB/Simulink 模块

2.5 虚拟阻感模块

图 8 所示模型将 I_{abc} 网侧电流分为幅值和相角单独运算, 将模型中网侧逆变器的寄生电阻(标幺值为 0.023)和滤波电感(标幺值为 0.18)分别等效为虚拟电阻和虚拟电感带入子系统, 将虚拟电阻和虚拟电感进行实部虚部化的幅值相角运算后, 阻抗幅值与电流幅值的乘积即为输出的电压幅值, 而相角相加即为对应的经过 L_s 和 R_a 后的新阻抗角。公式如下:

$$Z = R_a + j\omega L_s \quad (6)$$

$$|Z| = \sqrt{R_a^2 + (\omega L_s)^2} \quad (7)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L_s}{R_a} \right) \quad (8)$$

$$\alpha = \sin \left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \beta \right) \quad (9)$$

$$I_{abc}Z = I_{abc} |Z| \sin \alpha \quad (10)$$

最终得到虚拟电阻和虚拟电感上损耗的电压降为 $I_{abc} \cdot Z$ 。

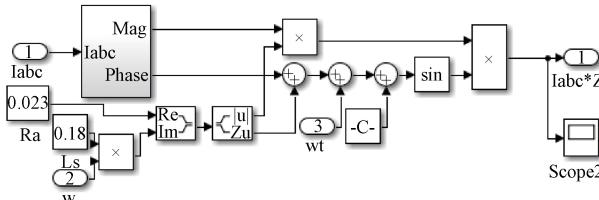


图 8 虚拟阻感模块的 MATLAB/Simulink 模块

2.6 电压控制模块

如图 9 所示, 在已经计算好的 abc 坐标下的 V_{abc} (pu) 转化到 $dq0$ 坐标下的 V_{dq0} , 通过选择器得到 V_d 和 V_q , 分别与测量单元测得的实际网侧 V_{sdq} 作差后, 送入 PI 控制器, 得到调节后的 V_{dq1} 。将该值继续代入网侧控制环节最终得到经过 VSG 调节后的 $dq0$ 坐标下的定子侧电压值。

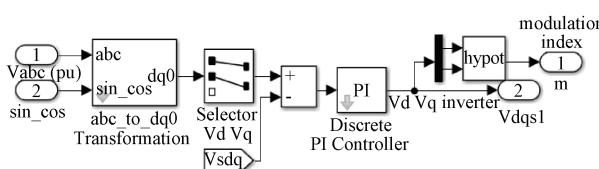


图 9 电压控制的 MATLAB/Simulink 模块

3 仿真分析

根据上文中搭建的 MATLAB/Simulink 仿真模型进行参数调节后进行仿真。本模型中设置系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数表

系统参数	设置参数值
小型风电场容量	$6 \times 1.5 \text{ MW}$
设置初始风速	15 m/s
电网频率	60 Hz
转子侧 ω_{ref} 标幺值	1.2
调速器模块参数	$K_p = K_i = 1$
励磁控制模块参数	$K_p = 10, K_i = 1$
虚拟同步算法模块参数	$D = 20$

3.1 系统正常运行工况

设置仿真时间为 10 s, 分别分析了添加 VSG 控制的系统与传统系统在 15 m/s 风速下不设置故障时的有功功率波形、风机转速(标幺值)波形。

如图 10 及表 2 所示, 经过 VSG 调节的系统有功功率的调节效果更为明显, 在 2 s 左右就可以基本稳定在 9 MW, 而未经过 VSG 调节的系统需要 5 s 才可以稳定在 9 MW。

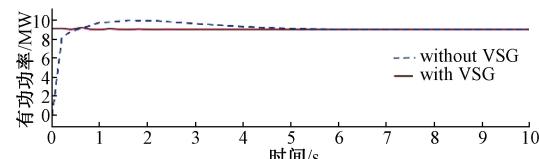


图 10 正常运行工况风电场输出有功功率波形

表 2 正常运行工况输出有功功率表

时间/s	1	2	4	6	8
有功功率/MW	With VSG	8.9	9	9	9
Without VSG	9.7	10	9.6	9.3	9.1

如图 11 及表 3 所示, 经 VSG 控制的系统可将转速控制在更接近 1.2 附近。

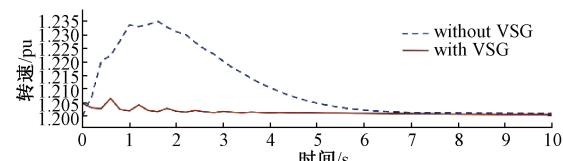


图 11 风电场风机转速波形

3.2 系统电压跌落工况时的无功调节

设置仿真时间为 2 s, 设置系统风速为 15 m/s, 设置大

表3 正常运行工况转速表

时间/s	1	2	4	6	8	
转速/ p.u.	With VSG	1.202	1.202	1.201	1.200	1.200
Without VSG		1.235	1.231	1.210	1.202	1.200

电网电压幅值于1 s时由1 p.u.跌落到0.5 p.u.,于1.1 s时从0.5 p.u.再次回升到1 p.u.。并分别分析了添加VSG控制的系统与传统系统的电压波形和无功功率波形。

如图12、13及表4所示,在1 s时电压幅值由1 p.u.跌落到0.5 p.u.,此时系统无功不足,在风机无功控制环节的调节下风场输出的无功功率在1 s后不断增加,在1.1 s时无功为12 Mvar,此时风机输出的电压亦跟随小幅回升,当1.1 s电压幅值由0.5 p.u.上升到1 p.u.时,系统无功功率充足,此时不再需要风场提供无功,所以此时风场输出的无功功率在1.4 s回落到0 Mvar。

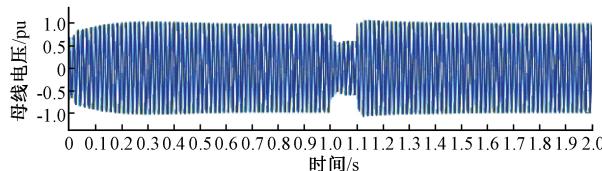


图12 风电场输出的575 V母线电压波形

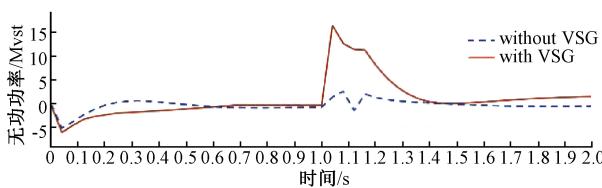


图13 风电场输出的无功功率波形

表4 电压跌落时无功功率表

时间/s	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
无功功率/ Mvar	With VSG	0	1	0	0
Without VSG		12	8	2	0

3.3 系统电压跌落工况时的有功调节

设置仿真时间为10 s,设置系统风速15 m/s,设置大电网电压幅值于0.05 s时由1 p.u.跌落到0.5 p.u.,于0.15 s时从0.5 p.u.再次回升到1 p.u.。

如图14及表5所示,电压跌落时,经过VSG调节的系统有功功率的调节效果更为明显,在4 s右就可以基本稳定在9 MW,而未经过VSG调节的系统需要6 s才可以稳定在9 MW。

3.4 系统风速改变时的工况

设置仿真时间为10 s,设置系统风速20 m/s,并分别分析了添加VSG控制的系统与传统系统的有功功率波

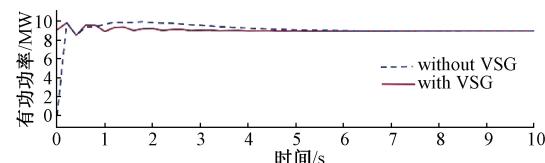


图14 风电场输出有功功率波形

表5 电压跌落时有功功率表

时间/s	1	2	4	6	8	
有功功率/ MW	With VSG	8.9	9.2	9.0	9.0	9.0
Without VSG		9.7	9.9	9.2	9.1	9.0

形、风机转速(标么值)波形。

如图15及表6所示,此时由于风速增大,有功出力将会增大,机械功率将大于电磁功率,控制系统为保证机械与电磁功率相等,将控制有功的出力,把多余的有功经过双馈风机的网侧逆变器传输给电网,以保证机组有功出力恒定为9 MW。所以在图中显示为有功功率先增大后减小,而经VSG控制的有功出力波动较小,调节速度更快,因此更加稳定。

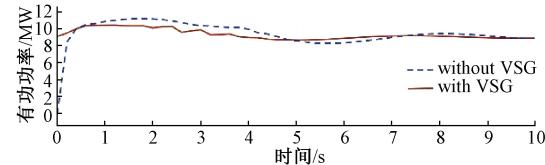


图15 风电场输出有功功率波形

表6 风速改变时有功功率表

时间/s	1	2	4	6	8	
有功功率/ MW	With VSG	10.2	10.0	9	9	9
Without VSG		10.3	11	10.0	8.2	9.4

如图16及表7所示,风速增大时转速都有增大的趋势,传统控制方法转速峰值达到了1.33,而VSG控制的转速峰值只有1.25。因此含VSG的控制方法可更好的控制转速。

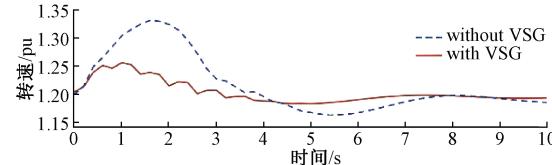


图16 风电场输出转速波形

表7 风速改变时的转速表

时间/s	1	2	4	6	8	
转速/p.u.	With VSG	1.25	1.22	1.18	1.19	1.20
Without VSG		1.3	1.33	1.20	1.17	1.17

在仿真分析中,运用 MATLAB/Simulink 仿真软件,将含 VSG 控制的双馈式风机模型与不含 VSG 控制的模型进行对比分析,验证了含网侧 VSG 控制的模型相比传统模型在正常运行、电压跌落、风速改变的等工况下对系统的稳定性的调节效果更优异。该模型可以为风机网侧逆变器缺乏惯性和阻尼提供解决方案,优化解决风机并网所带来的稳定性问题。在未来工作中,可考虑将该控制系统的调速器进行优化,使得调节曲线更为平滑^[14]。也可考虑将该模型采用状态空间的描述,以完整描述该控制系统特性。同时该模型也可经改进后用于解决混合多种新能源所构成的独立微电网时所带来的稳定性问题^[15]。

4 结 论

通过搭建含 VSG 的双馈式风机模型,并进行仿真调试,验证了在正常工况运行、电压跌落以及风速改变时,在双馈风机网侧逆变器上引入 VSG 的合理性,同时验证了含 VSG 控制的模型比传统的双馈式风机模型具有更加良好的调节性能。该模型中重点改进了双馈式风机网侧的逆变器并网控制策略,将 VSG 控制引入网侧控制,使经 VSG 调节后的电压信号成为控制信号的一部分,使得网侧逆变器可以体现出一定的惯性和阻尼特性,一定程度上解决了逆变器并网缺乏惯性和阻尼而导致系统发生不稳定波动的情况。为双馈式风机并网提供了一种新的控制策略以供参考,推动风电并网控制技术的进一步发展。提高了电力系统稳定运行的能力。

参考文献

- [1] 刘振亚.全球能源互联网[M].北京:中国电力出版社 2015:1-17.
- [2] 张兴,朱德斌,徐海珍.分布式发电中的虚拟同步发电机技术[J].电源学报,2012(3):1-6,12.
- [3] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1):133-148.
- [4] HUANG A. FREEDM system-a vision for the future grid[C]. Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2010:1-4.
- [5] 王思耕,葛宝明,毕大强.基于虚拟同步发电机的风

电场并网控制研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(21):49-54.

- [6] WANG S, HU J, YUAN X. Virtual synchronous control for grid-connected DFIG-based wind turbines[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(4):932-944.
- [7] 王桂英,韩奇霖,李天宇.风电装备 VSG 等效功率平抑及频率补偿方法[J].电力电子技术,2016,50(2):28-30.
- [8] 高澈,田新首,李琰,等.基于运行状态评估的双馈风机自适应虚拟同步发电机控制[J].电网技术,2018,42(2):517-523.
- [9] 丁明,杨向真,苏建徽.基于虚拟同步发电机思想的微电网逆变电源控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(8):89-93.
- [10] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (4): 1259-1267.
- [11] 宋琼,张辉,孙凯,等.多微源独立微网中虚拟同步发电机的改进型转动惯量自适应控制[J].中国电机工程学报,2017,37(2):412-423.
- [12] 高丙团,夏超鹏,张磊,等.基于虚拟同步电机技术的 VSC-HVDC 整流侧建模及参数设计[J].中国电机工程学报,2017,37(2):534-543.
- [13] 伍文华,陈燕东,罗安,等.一种直流微网双向并网变换器虚拟惯性控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(2):360-371.
- [14] 王瑜瑜,刘少军.电压型 PWM 串级调速系统控制策略的研究[J].电子测量技术,2017,40(6):80-84.
- [15] 林岩,张建成.含虚拟同步发电机的光/柴/储独立微网控制策略[J].电网技术,2017,41(4):1277-1284.

作者简介

韩江北,硕士研究生,主要研究方向为电力系统及其自动化。

E-mail:516550855@qq.com

刘志坚,博士、教授、副院长、硕士研究生导师,主要研究方向为电力系统稳定运行与控制。

E-mail:248400248@qq.com