

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181013

含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步发电机控制与分析

代林旺¹, 李少林¹, 秦世耀¹, 王瑞明¹, 宋鹏^{2,3}

(1. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192;

2. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;

3. 风光储并网运行技术国家电网公司重点实验室, 北京 100045)

摘要: 针对高比例风电电力系统频率/电压稳定性问题, 介绍了虚拟同步控制的理论基础, 对比分析了双馈风电机组与传统同步机数学模型。基于模型相似性推导了风电机组虚拟同步发电机的内电势、功角及功率传输方程, 并揭示了其变化规律。研究了一种含阻尼环节的电流源型风电机组虚拟同步控制策略, 并进行了虚拟同步控制外环和电流控制内环设计。在 Matlab/Simulink 中建立了双馈风电机组虚拟同步发电机仿真模型, 实现了虚拟同步发电机惯量、阻尼、一次调频和无功调压特性的全过程模拟。仿真结果证实了理论分析的正确性与控制策略的有效性。

关键词: 双馈风电机组; 虚拟同步发电机; 转子动能; 阻尼系数; 内电势; 功角

Control and analysis of current-source wind turbine virtual synchronous generator with damping coefficient

DAI Linwang¹, LI Shaolin¹, QIN Shiyao¹, WANG Ruiming¹, SONG Peng^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. State Grid Jibei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China; 3. Grid-connected Operation Technology for Wind-Solar-Storage Hybrid System State Grid Corporation Key Laboratory, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to deal with the problem of frequency/voltage stability of power system with high proportion of wind power, the theoretical basis of virtual synchronous control is introduced. The mathematical models of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) and traditional synchronous machines are compared and analyzed. Based on the similarity of models, the electromotive force, power angle, and power transmission equations of Wind Turbine Virtual Synchronous Generator (WT-VSG) are deduced, whose change regulations are revealed. A virtual synchronous control strategy of wind turbine with damping coefficient is researched. The design of virtual synchronous control outer loop and current control inner loop is performed. In Matlab/Simulink, the simulation model of the WT-VSG is established. The whole process simulation of the inertia, damping, primary frequency control, and reactive power-voltage regulation of the WT-VSG is realized. The simulation results confirm the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the control strategy.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 52010118000N).

Key words: doubly-fed induction generator based wind turbine; virtual synchronous generator; rotor kinetic energy; damping coefficient; electromotive force; power angle

0 引言

随着化石能源的消耗和环境的恶化, 许多国家在寻求清洁能源替代方案, 风力发电作为重要的清洁能源之一, 已被广泛应用。然而, 以双馈型和永

磁直驱型变速恒频风电机组为主的风电系统, 均通过电力电子变流器并网, 实现了转速与电网频率解耦, 功率输出与电网状态无直接关系, 导致变速风电机组不能快速响应系统频率变化^[1]。与此同时, 风电装机的增加不断挤占常规机组空间, 降低了电力系统的等效转动惯量和阻尼, 常规火电机组不得不提高功率备用水平以应对系统大功率缺失及故障

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52010118000N)

情况, 电力系统的调节压力逐步攀升, 安全稳定运行风险日益增加^[2]。

为应对大规模风电/光伏并网安全稳定运行的挑战, 借鉴传统同步机组的优良特性, 国内外学者提出了虚拟同步发电机 (Virtual Synchronous Generator, VSG) 概念^[3-5]。该技术可以通过模拟同步发电机组的机电暂态特性, 使采用变流器的电源具有同步发电机组的惯量、阻尼、一次调频、无功调压等并网运行外特性^[6], 从而实现新能源的友好接入。

综合已有研究成果, 对于虚拟同步发电机的研究与应用主要集中在微电网领域以及光伏系统的并网控制^[7-9]。针对风电系统的虚拟同步技术, 尤其是双馈型风电并网系统相对较少^[10-14], 文献[10]基于 PLL 动态特性的分析, 构建了同步旋转的虚拟转子轴, 利用虚拟转轴运动方程产生虚拟同步机电角度, 无功闭环产生励磁电流, 频率和电压的下垂方程模拟同步发电机的调速器和励磁调节器, 进而实现虚拟同步控制。文献[11]提出了一种应用于弱电网的风电虚拟同步发电机的控制方法, 转子运动方程代替 PLL 产生角度, 机端电压闭环产生励磁电压幅值, 两者合成双馈电机转子励磁电压矢量。文献[12]将通过同步控制(虚拟转子运动方程)和转子磁链的闭环控制, 得到虚拟励磁电压, 然后再变换为实际的转子励磁电压, 与此思想相似, 文献[13]进一步分析了机组并网电压的影响因素。文献[14]提出了一种基于虚拟阻抗的电压源型双馈风电机组虚拟同步策略, 实现了功率解耦。然而文献[11-13]并没有模拟传统同步机的频率、电压下垂特性, 并且以上研究采用的电压源型风电虚拟同步控制方式, 目前实现工程应用尚有难度。

考虑当前风电通常以矢量控制的电流源形式并网, 学术界多关注虚拟惯量、有功-频率下垂等环节的控制^[15-17]。本质上是通过加入与频率偏差成比例的有功指令, 实现一次调频特性, 加入与频率变化率成比例的有功指令, 实现虚拟惯量控制, 或者采用两者的综合控制形式, 能量的来源主要是转子动能和备用减载容量。本文综合虚拟同步控制特点与传统矢量控制的优点, 从基础理论入手, 分析了双馈电机与传统同步机的相似性, 以双馈电机的戴维南等效电路为基础, 推导了类似于传统同步机的虚拟同步机功率传输方程以及内电势与转子电流的关系, 研究了一种含阻尼环节的电流源型风电虚拟同步控制策略, 最后利用 Matlab 仿真验证了控制策略的正确性和有效性。

1 虚拟同步控制的理论基础

在电力系统中, 传统同步发电机因其较大的转动惯量, 在系统有功功率不平衡时, 可以有效限制频率的快速变化。同步发电机的转子运动方程反映了转子惯性及阻尼特性, 如式(1)所示^[18-19]。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_1) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量; ω 为同步机瞬时电角速度; ω_1 为电网同步电角速度; T_m 、 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩; D 为阻尼系数; θ 为电角度。

另外, 在系统的运行过程中, 系统频率和电压是动态变化的, 而维持两者的相对稳定, 调速器和励磁控制器起着关键作用, 两者的数学模型可以用下垂特性来表示^[18-19]。

$$\begin{cases} P_m = P_0 + \tau_p(\omega - \omega_1) \\ Q_m = Q_0 + \tau_q(U_t - U_g) \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ_p 为有功-频率下垂系数; P_0 为有功功率初始指令; P_m 为最终的发电机功率指令; τ_q 为无功-电压下垂系数; Q_0 为无功功率初始指令; Q_m 为无功功率指令; U_t 为发电机端电压; U_g 为电网电压。

综上所述, 为实现对同步发电机运行外特性的模拟, 风电机组需具备以下两种能力: (1) 模拟同步发电机的转子运动方程, 实现对频率波动的快速抑制; (2) 模拟同步发电机的调速器和励磁控制器, 实现对系统频率和电压的支撑。

双馈电机等效电路可以表示成图 1 所示^[20]。

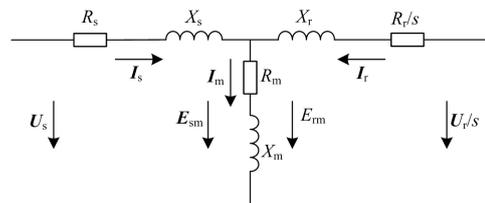


图 1 双馈感应发电机等效电路

Fig. 1 DFIG equivalent circuit

根据图 1, 定、转子电流矢量及励磁电动势之间的关系可以表示为

$$\begin{cases} \mathbf{U}_s = -\mathbf{E}_{sm} + (R_s + jX_s)\mathbf{I}_s \\ \mathbf{U}_r/s = -\mathbf{E}_{rm} + (R_r + jX_r)\mathbf{I}_r \\ \mathbf{E}_{sm} = \mathbf{E}_{rm} \end{cases} \quad (3)$$

式中: \mathbf{U}_s 、 \mathbf{U}_r 分别为定、转子端电压矢量; \mathbf{E}_{sm} 、 \mathbf{E}_{rm} 分别为定、转子侧励磁电动势; \mathbf{I}_s 、 \mathbf{I}_r 分别为定、

转子电流矢量； X_s 、 X_r 分别为定、转子漏抗； R_s 、 R_r 分别为定、转子绕组电阻。

由式(3)可知，定、转子励磁电动势直接相关，通过双馈电机转子电压、电流控制，可以实现对定子励磁电动势的控制，进而实现对输出功率的控制，这一机制正是实现双馈风电机虚拟同步控制的基础。

2 风电虚拟同步发电机的控制策略

虚拟同步发电机的控制包括虚拟同步控制外环和转子电流控制内环。外环通过模拟同步发电机的转子运动方程和下垂特性，获得虚拟同步机内电势幅值和角度，实现虚拟同步控制；内环根据虚拟同步机内电势幅值和角度计算转子电流目标值，通过对转子电流的控制，获得转子励磁电压，最终实现机组有功和无功功率控制。

2.1 虚拟同步控制外环

假设双馈电机定、转子均采用电动机惯例，在同步旋转坐标系下，双馈电机电压与磁链方程^[20]如式(4)、式(5)所示。

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} + p \psi_{sd} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} + p \psi_{sq} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rq} + p \psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega_1 - \omega_r) \psi_{rd} + p \psi_{rq} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (5)$$

式中： u 、 i 、 R 、 ψ 、 ω 、 L 分别表示电压、电流、电阻、磁链、角频率、电感，下标 s 、 r 表示定子、转子分量，下标 d 、 q 表示同步旋转 d 、 q 轴的分量； ω_1 为电网同步角频率； L_m 为定转子绕组间互感； p 为微分算子， $p=d/dt$ 。

由式(5)可知，

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{\psi_{rd}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sd} \\ i_{rq} = \frac{\psi_{rq}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

忽略定子磁链的暂态过程，将式(5)、式(6)代入式(4)得，

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_1 \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{sq} - \frac{\omega_1 L_m \psi_{rq}}{L_r} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_1 \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{sd} + \frac{\omega_1 L_m \psi_{rd}}{L_r} \end{cases} \quad (7)$$

定义新变量如下：

$$\begin{cases} E'_d = -(L_m/L_r) \omega_1 \psi_{rq} \\ E'_q = (L_m/L_r) \omega_1 \psi_{rd} \\ X' = \omega_1 (L_s - L_m^2/L_r) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)，可得：

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - X' i_{sq} + E'_d \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + X' i_{sd} + E'_q \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)可得双馈电机的戴维南等效电路，如图2所示。

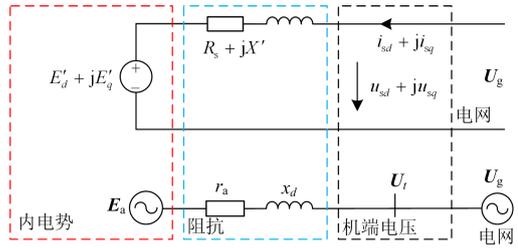


图2 双馈电机戴维南电路与传统同步机等效电路对比
Fig. 2 Comparison between Thevenin's circuit of DFIG and equivalent circuit of synchronous machine

图2给出了双馈电机与传统同步发电机的等效电路，可以看出，双馈电机与同步电机具有相同的电路结构形式，可以模拟同步发电机的控制方式实现虚拟同步控制。

对于大功率尤其 MW 级风电机组，定子电阻与感抗相比影响很小，可忽略不计。若以定子电压 d 轴定向，结合式(9)，双馈电机定子侧有功功率、无功功率可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sd} = -\frac{3 U_s E' \sin \delta_{vsg}}{2 X'} \\ Q_s = \frac{3}{2} u_{sd} i_{sq} = \frac{3 U_s E' \cos \delta_{vsg}}{2 X'} - \frac{3 U_s^2}{2 X'} \end{cases} \quad (10)$$

式中： U_s 为机端电压幅值； E' 为内电势幅值； δ_{vsg} 为功角，并有以下关系：

$$\begin{cases} E'_d = E' \cos \delta_{vsg} \\ E'_q = E' \sin \delta_{vsg} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知，双馈电机与同步电机具有一致的功率传输方程，通过控制内电势幅值 E' 与功角 δ_{vsg} ，可实现对双馈电机有功功率、无功功率的控制。同时可以看出，功率与内电势幅值、功角存在着耦合现象，与传统矢量控制的解耦思想是相逆的。

根据以上分析，可以画出内电势、机端电压及转子轴系矢量间的关系，如图3所示。

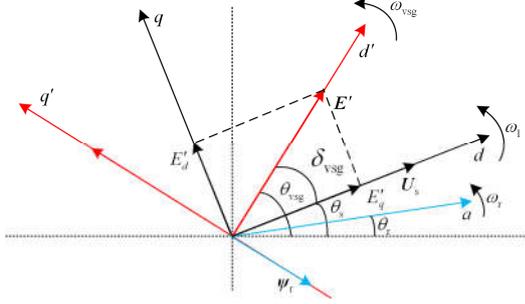


图3 虚拟同步控制矢量关系图

Fig. 3 Vector diagram of virtual synchronization control

根据图3可知: 定子电压矢量 U_s 在同步旋转 dq 坐标系以电网同步角频率 ω_1 旋转, 位置角为 θ_s ; 内电势矢量 E' 在 $d'q'$ 旋转坐标系以角频率 ω_{vsg} 旋转, 位置角为 θ_{vsg} , 且 E' 超前转子磁链矢量 ψ_r 90° ; 转子位置角为 θ_r , 并以角速度 ω_r 旋转。同时可知, 功角 δ_{vsg} 、角频率 ω_{vsg} 满足等式(12)。

$$\begin{cases} \omega_{vsg} = p\theta_{vsg} \\ \delta_{vsg} = \theta_{vsg} - \theta_s = \int (\omega_{vsg} - \omega_1) dt \end{cases} \quad (12)$$

依据上述分析, 参考传统同步机转子运动方程式(1)和下垂特性式(2), 可以得到虚拟同步机外环控制方程如式(13)。

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{vsg}^* = \frac{1}{J_{vsg} \omega_s} [P_0 + \tau_p (\omega_n - \omega) - P_{mea} - D_{vsg} (\omega_{vsg}^* - \omega) \omega] \\ E^* = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) [Q_0 + \tau_q (U_n - U_s) - Q_{mea}] \end{cases} \quad (13)$$

式中: ω_{vsg}^* 、 E^* 分别为虚拟同步机角频率、内电势幅值参考值; J_{vsg} 为虚拟同步机的转动惯量, 一般用惯性时间常数 T_j 表示, $T_j = J_{vsg} \omega_n^2 / P_n$, ω_n 为额定角频率, 当电网正常运行时, ω_1 与 ω_n 相等, 为 314 rad/s, P_n 为额定功率; D_{vsg} 为虚拟同步机的阻尼; P_{mea} 为实际输出有功功率; k_p 、 k_i 为无功控制环的比例、积分系数; U_n 为机端电压额定值; Q_{mea} 为实际输出的无功功率。

2.2 电流控制内环

电流内环控制目的是通过转子电流的控制, 获得转子励磁电压。联立式(4)、式(5)和式(8)可得转子电压方程:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{X'}{\omega_1} p i_{rd} + \Delta u_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{X'}{\omega_1} p i_{rq} + \Delta u_{rq} \end{cases} \quad (14)$$

式中, Δu_{rd} 、 Δu_{rq} 为转子电压补偿, 表达式为

$$\begin{cases} \Delta u_{rd} = \frac{(\omega_1 - \omega_r) L_m U_s}{\omega_1 L_s} - \frac{(\omega_1 - \omega_r)}{\omega_1} X' i_{rq} \\ \Delta u_{rq} = \frac{(\omega_1 - \omega_r)}{\omega_1} X' i_{rd} \end{cases} \quad (15)$$

转子电流可采用 PI 调节器控制, 以 PI 调节器的输出来控制式(14)中的转子电流动态项, 可得转子电压的参考值如式(16)。

$$\begin{cases} u_{rd}^* = \left(k_{ip}^q + \frac{k_{ii}^q}{s} \right) (i_{rd}^* - i_{rd}) + \Delta u_{rd} \\ u_{rq}^* = \left(k_{ip}^q + \frac{k_{ii}^q}{s} \right) (i_{rq}^* - i_{rq}) + \Delta u_{rq} \end{cases} \quad (16)$$

转子电流参考值由虚拟同步控制外环产生的内电势的幅值和角度计算得到, 将式(8)、式(9)代入式(6)可得式(17)。

$$\begin{cases} i_{rd}^* = \left(\frac{1}{L_m \omega_1} + \frac{L_m}{L_r X'} \right) E_q^* \\ i_{rq}^* = - \left(\frac{1}{L_m \omega_1} + \frac{L_m}{L_r X'} \right) E_d^* + \frac{L_m}{L_r X'} U_s \end{cases} \quad (17)$$

综合以上分析, 式(13)、式(15)一式(17)构成了风电虚拟同步发电机控制方程, 控制框图如图4所示, 通过对转子侧变流器控制即可实现同步机特性模拟, 而网侧变流器仍可保持原有的控制方式, 即控制直流母线电压和网侧无功, 此处不再赘述。

3 仿真分析

为了验证本文所提虚拟同步机控制策略的正确性, 利用 Matlab 建立了 1.5 MW 双馈风电机组虚拟同步机的仿真模型, 采用单机接入理想电源方式, 仿真结构如图5所示。机组仿真参数如下: 风电机组额定功率 1.5 MW, 定子电阻和电感分别为 0.007 714 Ω 、0.000 284 H, 转子电阻和电感分别为 0.004 155 Ω 、0.000 455 8 H, 励磁电感为 0.017 67 H, 极对数 2, 风轮惯量 11.2 s, 发电机惯量 2.52 s, 虚拟惯性时间常数 $T_j=5$ s。

3.1 频率扰动仿真

以频率降低为例, 分别考察: (1) 风电机组传统矢量控制; (2) 虚拟同步控制且具有惯量、阻尼和电压下垂环节 ($T_j=5$, $D_{vsg}=100$, $\tau_q=2$, $\tau_p=0$); (3) 虚拟同步控制且具有惯量、阻尼、电压下垂和一次调频环节 ($T_j=5$, $D_{vsg}=100$, $\tau_q=2$, $\tau_p=20$)。本文采用第3种控制方式, 机组仿真结果如图6所示, 为简便起

见,图中以“传统控制”、“VSG, $\tau_p=0$ ”、“VSG, $\tau_p=20$ ”分别表示上述三种控制方式。其次考察虚拟同步控制时不同阻尼系数($T_j=5, \tau_p=20, \tau_q=2$ 不变, D_{vsg}

分别取 60,100,140)对系统输出响应的影响,仿真结果如图 7 所示。

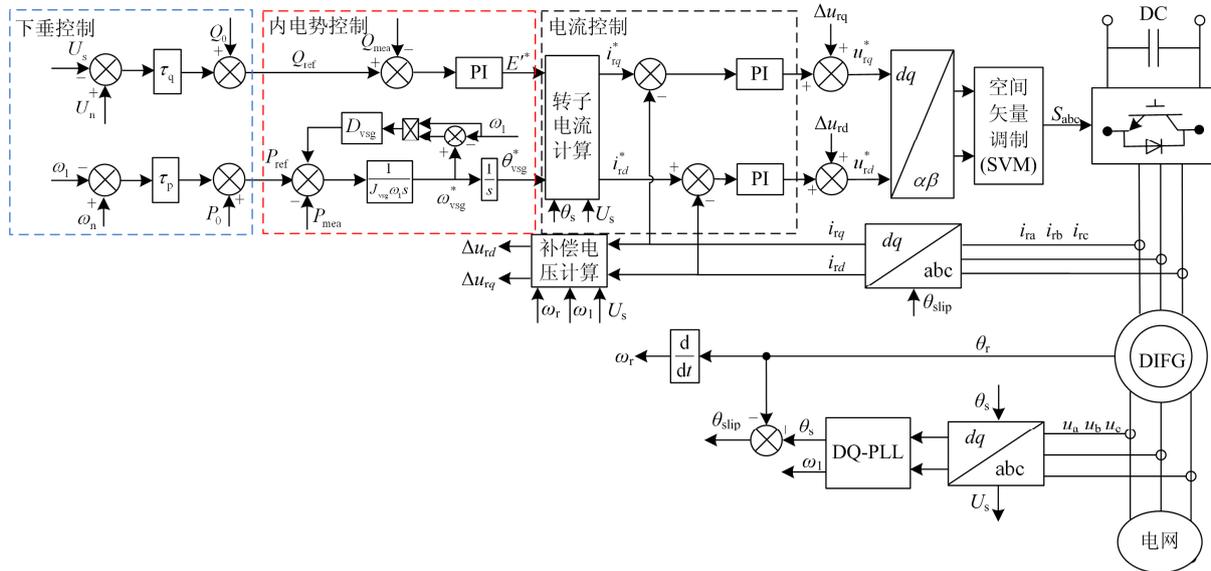


图 4 风电机组虚拟同步发电机控制框图

Fig. 4 Control block diagram of WT-VSG

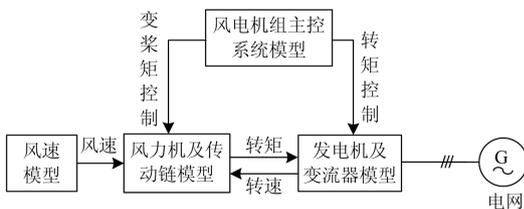


图 5 风电虚拟同步发电机仿真系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of WT-VSG

图 6 中,频率测试波形采用斜率变化方式,在 $t=20$ s 时,系统频率由 50 Hz 变化至 49 Hz,频率变化率 0.5 Hz/s, $t=30$ s 时,频率由 49 Hz 以同样的速率恢复至 50 Hz。在频率变化的整个过程中,第一种控制方式即传统控制,风电机组发电机转速、有功功率仅有微小扰动,基本可忽略不计,无功功率、桨距角无变化。

虚拟同步机采用第二种控制方式时,在频率降低过程中,发电机转速由 1 538 r/min 逐渐降低至 1 522 r/min,有功输出由 0.577 p.u.变化至 0.634 p.u.,考虑功率变化的近似计算式,其中 $df/dr=0.5$, $T_j=5$,可近似算得功率支撑量为 0.05 p.u.,与仿真相近。当频率稳定在 49 Hz,频率变化消失,发电机转子加速,有功功率回落,最低值 0.546 p.u.,当频率由 49 Hz 至 50 Hz 时,有功由 0.572 p.u.降低至 0.515 p.u.,响应过程与上述过程相逆。整个频率事

件中,虚拟同步机的功角及内电势与有功功率曲线变化相似。

虚拟同步机采用第三种控制方式时,调频死区设定为 ± 0.03 Hz,并限定一次调频环节有功调节量最大值为 ± 0.1 p.u.。在频率的降低过程中,有功功率输出由 0.577 p.u.变化至 0.73 p.u.,根据有功频率下垂系数 $\tau_p=20$,一次调频环节理论有功调节量 0.1 p.u.,有功实际输出约为惯量支撑量和一次调频环节支撑量的总和,与理论基本一致。当频率稳定在 49 Hz,仅有一次调频环节起作用,有功输出变为 0.67 p.u., $t=30$ s 时频率开始恢复,在惯量作用下,有功变化至约 0.61 p.u.,当频率进入调频死区后,一次调频退出,转子由最低转速 1 347 r/min 开始恢复,有功输出跌落至 0.24 p.u.,然后机组根据最优转速-转矩曲线,不断调整出力直至实际水平。在频率事件期间,虚拟同步机的功角及内电势均有与有功功率相似的变化,同时在频率稳定在 49 Hz 期间,由于转子转速由超同步切换至次同步,转子侧变流器有功由发出变为吸收,并逐渐增加,为保持总有功输出,定子侧输出功率发出的有功功率逐渐增加,功角和内电势曲线呈现上扬特点。

图 7 中, $t=20$ s 时系统频率由 50 Hz 变化至 49 Hz,频率变化率 0.5 Hz/s。由图 7 可以看出,随着阻尼系数的增大,系统的超调量逐渐减小,但响应速度也逐渐降低,且恢复过程中机组将面临更低的

起点转速, 影响系统的稳定性。

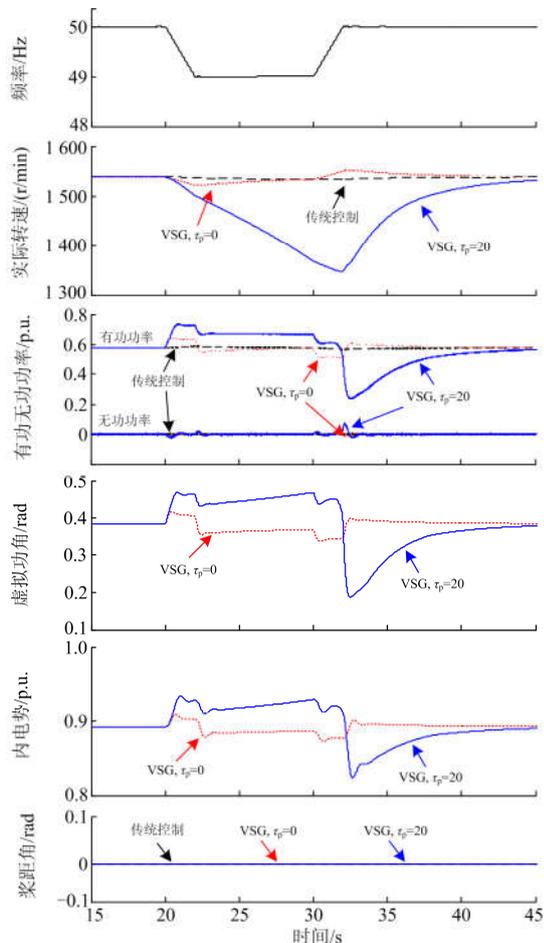


图 6 频率扰动时采用传统控制与虚拟同步控制仿真对比图

Fig. 6 Comparison between traditional control and WT-VSG under frequency disturbance

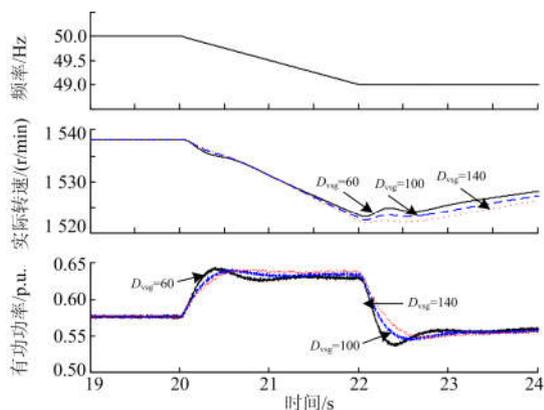


图 7 频率扰动时采用不同阻尼系数虚拟同步控制仿真对比

Fig. 7 Comparison between WT-VSG with different damping coefficient under frequency disturbance

3.2 电压扰动仿真

以电压降低为例, 分别考察传统矢量控制和虚

拟同步机的响应情况, 设定电压调节死区 ± 0.01 p.u., 无功-电压下垂系数为 $\tau_q=2$, 仿真结果如图 8 所示。

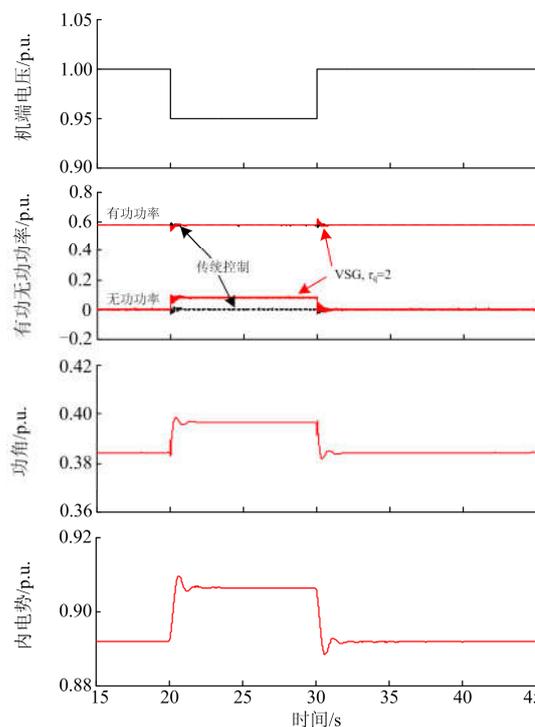


图 8 电压扰动时采用传统控制与虚拟同步控制仿真对比图

Fig. 8 Comparison between traditional control and WT-VSG under voltage disturbance

由图 8 可以看出, $t=20$ s 时, 机端电压由额定值变化为 0.95 p.u., $t=30$ s 时, 传统矢量控制时, 电压变化瞬间机组有功、无功有微小的波动, 恒定 0.95 p.u. 期间, 有功、无功功率无变化。对于风电虚拟同步机, 电压变化瞬间, 有功会有小幅尖峰, 尖峰变化量约 0.03 p.u., 电压恒定在 0.95 p.u. 时, 有功保持稳定, 无功功率输出 0.08 p.u., 与理论值一致。在电压事件期间, 功角和内电势均有与无功功率相似的变化。

4 结论

虚拟同步机技术是应对新能源并网安全运行挑战的关键技术之一, 考虑当前虚拟同步机多运行在微网环境且电压源型风电虚拟同步机并网应用尚存困难, 本文结合传统矢量控制, 研究了一种适应于并网运行的电流源型风电虚拟同步控制策略。总结如下。

1) 双馈发电机与传统同步机具有相似的电路结构和功率传输方程, 双馈风电机组可以模拟同步机的控制机制, 通过控制内电势幅值与功角, 实现对双馈机组有功功率、无功功率的控制。

2) 通过系统频率和机端电压的扰动仿真, 结果表明, 本文所提含阻尼环节的风电虚拟同步控制策略, 可以实现对传统同步机惯量、阻尼、无功调压和一次调频功能的模拟。

3) 机组输出的有功、无功功率与功角、内电势幅值呈耦合特性, 即功率波动会同时引起功角和内电势幅值的变化, 与传统同步发电机响应特性一致。

本文研究基于转子动能的利用, 当转子转速降至保护值, 机组将停止对系统的贡献, 且转子恢复过程会导致机组功率的跌落, 下一步可以在本文基础上研究基于功率备用(含储能)方式的控制, 结合现场试验开展虚拟同步控制的并网适应能力研究。

参考文献

[1] 张冠锋, 杨俊友, 孙峰, 等. 基于虚拟惯量和频率下垂控制的双馈风电机组一次调频策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 225-232.
ZHANG Guanfeng, YANG Junyou, SUN Feng, et al. Primary frequency regulation strategy of DFIG based on virtual inertia and frequency droop control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 225-232.

[2] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.

[3] ZHONG Qingchang, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.

[4] ZHONG Qingchang, NGUYEN P L, MA Z, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2): 617-630.

[5] 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, 10(3): 1-6.
ZHANG Xing, ZHU Debin, XU Haizhen. Review of virtual synchronous generator technology in distributed generation[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3): 1-6.

[6] 吕志鹏, 盛万兴, 刘海涛, 等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.
LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.

[7] 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.
LIN Yan, ZHANG Jiancheng. Control strategy of islanded photovoltaic-diesel-storage microgrid with virtual synchronous generator[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1277-1284.

[8] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 28-34.
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.

[9] 陶亮, 程军照, 王文玺, 等. 虚拟同步发电机参数设计及优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 128-135.
TAO Liang, CHENG Junzhao, WANG Wenxi, et al. Methods of parameter design and optimization in virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 128-135.

[10] ZHAO Yangyang, CHAI Jianyun, SUN Xudong. Virtual synchronous control of grid-connected DFIG-based wind turbines[C] // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 15-19, 2015, Charlotte, NC, USA, 2015: 2980-2983.

[11] WANG Shuo, HU Jiabing, YUAN Xiaoming. 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.

[12] 张琛, 蔡旭, 李征, 等. 具有自主电网同步与弱网稳定运行能力的双馈风电机组控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 476-485.
ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng, et al. Control of DFIG-based wind turbines with the capability of automatic grid-synchronization and stable operation under weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 476-485.

[13] 王磊, 张琛, 李征, 等. 双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 85-90.
WANG Lei, ZHANG Chen, LI Zheng, et al. Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 85-90.

- [14] 谢震, 孟浩, 张兴, 等. 基于定子虚拟阻抗的双馈风电机组虚拟同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 157-163.
XIE Zhen, MENG Hao, ZHANG Xing, et al. Virtual synchronous control strategy of DFIG-based wind turbines based on stator virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 157-163.
- [15] 李少林, 秦世耀, 王瑞明, 等. 大容量双馈风电机组虚拟惯量调频技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 145-150.
LI Shaolin, QIN Shiyao, WANG Ruiming, et al. Control strategy of virtual inertia frequency regulation for large capacity DFIG-based wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 145-150.
- [16] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 126-131.
PAN Wenxia, QUAN Rui, WANG Fei. A variable droop control strategy for doubly-fed induction generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 126-131.
- [17] HWANG M, MULJADI E, PARK J W, et al. Dynamic droop-based inertial control of a doubly-fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 924-933.
- [18] 张波, 颜湘武, 黄毅斌, 等. 虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 42-52.
ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 42-52.
- [19] 陈衍. 电力系统稳态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [20] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
YANG Shuying. Converter and control for doubly fed induction generator-based wind power generation[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007.

收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-09-29

作者简介:

代林旺(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力电子与电力传动;
E-mail: dlw969@163.com

李少林(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术、电力电子与电力传动;

秦世耀(1977—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网检测技术、电机与电器。

(编辑 葛艳娜)