

DOI: 10.7667/PSPC160783

双馈风电机组的虚拟同步控制及弱网运行特性分析

王磊¹, 张琛¹, 李征², 蔡旭¹

(1. 电子信息与电气工程学院风力发电研究中心, 上海交通大学, 上海 200240;
2. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要: 采用传统矢量控制的风电机组对外表现为电流源特性, 大型风电机组在接入配电网环境时容易引发电压失稳、缺乏惯量等问题。为此, 研究了基于虚拟同步风电机技术的双馈风电机组控制方法。在详细分析影响并网点电压因素的基础上, 研究电网等效阻抗对静态电压稳定性的影响。给出一种虚拟同步控制下双馈风电机组并网频率、电压的调节方案。研究表明, 相对矢量控制方法, 虚拟同步控制的双馈风电机组在弱电网下具有良好的电压稳定性。此外, 该控制方法在降低机端电压冲击以及提供电网频率支撑等方面具有明显优势。仿真结果验证了所给虚拟同步控制策略的可行性和有效性。

关键词: 弱电网; 风力发电; 双馈风电机组; 电流源型控制; 虚拟同步发电机

Virtual synchronous generator control for DFIG wind turbines and its operation characteristics in weak grid

WANG Lei¹, ZHANG Chen¹, LI Zheng², CAI Xu¹

(1. Wind Power Research Center, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Vector control makes the wind turbine equivalent to a current source and large-scale wind turbines connected to distributed network decrease voltage stability of grid and lack required inertia. To solve these issues, virtual synchronous generator control strategy for DFIG wind turbines is studied. By means of detailed analysis on the voltage of the point of common coupling (PCC), the impact of the grid impedance on static voltage stability is investigated. A virtual synchronous generator control strategy for DFIG wind turbines regulating frequency and voltage is presented. Studies show that the wind turbine using the virtual synchronous generator control strategy has better voltage instability than that using the current-source control strategy. Furthermore, this control strategy has obvious advantages in the aspects of reducing the surge of generator terminal voltage and providing frequency support for grid. Simulated results verify the feasibility and efficiency of the virtual synchronous generator control strategy.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 14ZR1400700).

Key words: weak grid; wind power; DFIG wind turbines; current source control; virtual synchronous generator

0 引言

风电并入电网会带来并网点电压波动, 对于相同的风况, 波动的大小与并入电网的强弱相关^[1-2]。对于接入配电网的分散式风电, 由于处于电网末端, 电压波动往往更加严重。为保证接入点电压稳定, 研究风电接入配电网的电压问题显得尤为重要。

目前国内大规模风电汇集系统配备动态无功补

偿装置进行电压调整, 但存在效率低、可靠性低、响应慢等缺点^[3]。对于分散式接入的风电机组, 利用机组自身进行无功电压控制是更经济的办法。大多数风电机组采用恒功率因数控制方式^[4-5], 为充分发挥其无功调节的能力, 有学者综合无功补偿设备和机组的无功调节能力, 共同参与配电网的无功优化^[6-8]。

上述研究中风电机组均采用有功、无功解耦的矢量控制并网技术, 机组对外表现为电流源特性, 无法为配电网提供必要的电压和频率支撑, 该问题

在弱电网下更为严重^[9]。改变控制方式使得机组对外表现为电压源特性可为风电并网提供新方式,已提出的虚拟同步发电机技术,可使并网逆变器在机理上和特性上能与同步发电机相近^[10-14],具有维持系统功率平衡和恒定机端电压的能力,显著提高了系统稳定性,且已有了适用于风电机组的控制方式相关研究^[15-16],但尚缺乏对其应用于风电并入弱电网的相关研究。

本文分析影响并网点电压的相关因素,利用无功电压灵敏度研究电网阻抗对静态电压稳定性的影响,研究采用虚拟同步发电机技术的双馈风电机组控制策略。通过仿真验证了虚拟同步控制在弱电网下具有良好的电压稳定性、保持机端电压恒定和提供电网频率支撑,利于电网对风电的接纳。

1 风电接入弱电网时的电压稳定

1.1 风电接入弱电网的并网点电压

以单台风电机组接入配电网为例,简化网络得到图 1。其中公共耦合点电压幅值为 V_{PCC} , 电压相角为 δ , 风电出力为 $P_w + jQ_w$, 传输线阻抗为 $R_t + jX_t$, 电网阻抗为 $R_g + jX_g$, 为方便计算且考虑到配电网中 X_g/R_g 接近 1, 设 $X_g = R_g$, 负载为 $P_L + jQ_L$, 电网系统注入公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)的视在功率为 $P_i + jQ_i$ 。

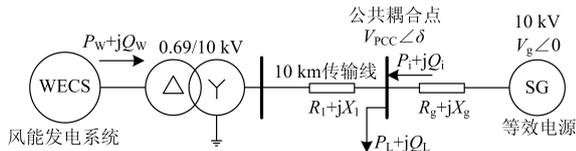


图 1 风电系统接入配电网电路图

Fig. 1 Circuit of wind power connected to distributed network

电网系统向 PCC 点注入功率可计算为

$$P_i + jQ_i = V_{PCC} \angle \delta \left(\frac{V_g - V_{PCC} \angle \delta}{R_g + jX_g} \right)^* \quad (1)$$

消去 δ , 可得:

$$(X_g P_i + X_g Q_i + V_{PCC}^2)^2 + (X_g Q_i - X_g P_i)^2 = V_g^2 V_{PCC}^2 \quad (2)$$

进一步解得 PCC 点电压幅值为

$$\begin{cases} V_{PCC} = \sqrt{\frac{V_g^2 - 2X_g(P_i + Q_i) - \sqrt{\Delta}}{2}} \\ \Delta = V_g^4 - 4X_g V_g^2(P_i + Q_i) - 4X_g^2(P_i - Q_i)^2 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,系统注入有功、无功,电网阻抗影响 PCC 点电压。

1.2 系统功率变化的影响

由式(3)考虑系统注入有功为正、负和零的 3 种

不同情况下,PCC 点电压幅值 V_{PCC} 与系统注入无功 Q_i 的关系如图 2 所示,可见系统向配电网注入的无功 Q_i 增加,PCC 点电压降低。

风电出力减小时,系统需要向 PCC 点注入有功以平衡有功缺额,即 P_i 增大,导致 PCC 点下降。此时利用风电机组无功调节能力,改变系统注入的无功功率可以改善并网点电压。但是由于在 10 kV 中压传输线路损耗较大,有功和无功不解耦,系统潮流关系复杂,使得利用改变风机功率因数来改善接入点电压水平的方案也有一定局限性。当风速较低时,受机组和变流器容量所限也可能出现并网点电压过低的情况。

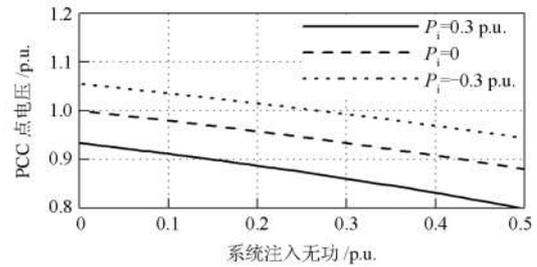


图 2 PCC 点电压

Fig. 2 Voltage of PCC

除了风电出力外,影响系统潮流的还有配网内功率性冲击负荷,会导致配网内电压闪变、波动。

1.3 电网阻抗的影响

一般来说,在超高压电网中,因输电线路的导线截面较大, $X_g \gg R_g$,所以 $Q_i X_g$ 对电压降影响较大,亦即无功功率 Q_i 的数值对电压影响较大;但是在电压不太高的地区性电网中, X_g 不满足远大于 R_g 的条件。电网强弱通常依据短路比(Short Circuit Ratio, SCR)进行划分,SCR 定义为电网短路容量与设备额定容量之比。通常该值大于 20 的电网认为是强电网,小于 6 的电网为弱电网。

由式(3)求取并网点电压灵敏度 $\partial V_{PCC} / \partial Q_i$:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_{PCC}}{\partial Q_i} = \frac{-2X_g - \frac{1}{2\sqrt{\Delta}} \frac{\partial \Delta}{\partial Q_i}}{4\sqrt{\frac{V_g^2 - 2X_g(P_i + Q_i) - \sqrt{\Delta}}{2}}} \\ \frac{\partial \Delta}{\partial Q_i} = -4X_g V_g^2 + 8X_g^2(P_i - Q_i) \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)得到并网点电压灵敏度与电网阻抗的关系,如图 3 所示。可以看出,电网阻抗越大,电压稳定性越差,且在系统注入的有功增大时更加恶化。当 $P_i = 0.3$ p.u. 时,如果电网阻抗大于 0.69 p.u.,电压敏感度迅速增大并趋于无穷大,此时功率的极

小变化也会导致电压瞬间崩溃, 电压抗干扰能力很差, 故接入点临界短路比约为 1.45, 且应具备一定裕量。

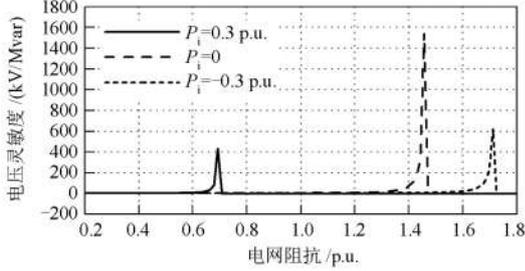


图 3 并网点电压灵敏度

Fig. 3 Voltage sensitivity of PCC

2 双馈风电机组的虚拟同步控制

基于矢量控制的电流源型控制(Current Control Strategy, CCS)是现有并网型风力发电机组最常用的控制方式。根据风力机的最大功率跟踪输出指令, 基于有功、无功与同步坐标轴系下 d 、 q 轴电流的解耦关系, 实现机组的有功、无功控制。这种控制下的风力机组对电网表现出反负荷的接口特性, 使得风电场内风电机组集群只能做电流源汇集, 对电力系统的机械惯量无贡献, 电力系统的电压和频率的稳定性下降。同时, 为了实现发电机稳态运行时的功率解耦控制, 电机模型控制需要基于锁相环跟踪电网, 从而使得风电机组对外表现为非自治发电单元, 即不具有内禀性的频率和电压支撑能力^[9]。

为解决风电并入弱电网的电压、频率稳定性等问题, 可利用虚拟同步发电机技术(Virtual Synchronous Generator, VSG)实现并网。虚拟同步发电机技术的有功-频率控制原理可用方程式(5)表示。

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \quad (5)$$

式中: J 为同步发电机的转动惯量; ω 为同步发电机的机械角速度也即为其电气角速度; ω_0 为电网同步角速度; T_m 和 T_e 分别为同步发电机的机械和电磁转矩; D 为阻尼系数。由于 J 和 D 的存在, 使得并网逆变器在功率和频率动态中具有了惯量。

电压控制可给定逆变器输出电压矢量的幅值, 再结合有功-频率控制得到的电角速度, 即可模拟电压源的特性控制逆变器输出。

2.1 网侧变换器控制

网侧变换器主要用以保持直流母线电压恒定, 保证变换器电压源输出特性。在虚拟同步发电机技术的基础上, 网侧变换器控制如图 4 所示。直流母线电压给定值 E_{dc}^* 与其实际值 E_{dc} 经 PI 调节器后得

到网侧变换器有功给定值 P_g^* , 与网侧变换器实际输出有功值 P_g 进行有功-频率控制, J_1 为虚拟转动惯量, D_1 为虚拟阻尼系数, 有功-频率控制得到的频率值积分得到 θ_g , 即为网侧变换器输出电压矢量角度。 U_{mag} 为网侧变换器输出电压矢量幅值, $u_{g\alpha}$, $u_{g\beta}$ 分别为网侧输出电压在两相静止坐标系下的值, S_{ga} , S_{gb} , S_{gc} 为网侧变换器中各相桥臂的开关函数。

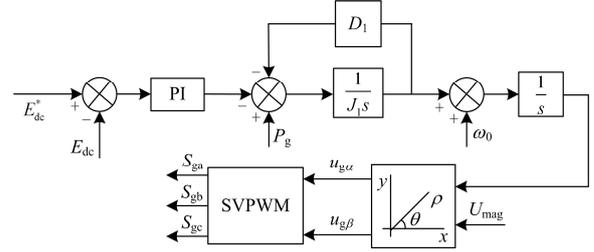


图 4 网侧变换器控制策略

Fig. 4 Control scheme of grid-side converter

网侧变换器控制中无电流环, 变换器输出电压矢量幅值 U_{mag} 即可控制网侧变换器对外表现为电压源的电压幅值, 且 J_1 和 D_1 的存在使得网侧变换器具有了对功率和频率的惯量。

2.2 转子侧变换器控制

转子侧变换器的有功-频率控制原理与网侧变换器相同, 如图 5 所示。 P^* 为 DFIG 输出有功的参考值, ω_r 为 DFIG 转速, T^* 为电磁转矩参考值, T_e 为实际电磁转矩, J_2 为虚拟转动惯量, D_2 为虚拟阻尼系数, ω_{slip} 为转差电角速度, θ_r 为转子位置角, θ_{slip} 为转差角。

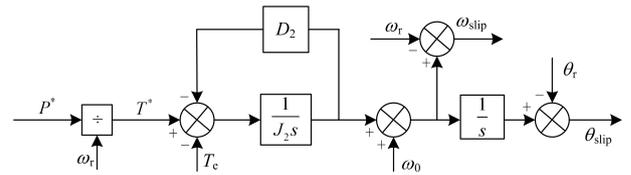


图 5 转子侧变换器的有功-频率控制

Fig. 5 Active power-frequency control diagram of rotor-side converter

网侧变换器直接与电网相连, 但双馈感应电机的定子与电网直接相连, 转子侧变换器与转子相连, 因此对双馈感应电机的定转子电压关系展开分析。同步旋转坐标系中 DFIG 电压方程和磁链方程为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + d\psi_s/dt + j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r I_r + d\psi_r/dt + j\omega_{slip} \psi_r \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_s 和 U_r 分别为定、转子端电压矢量; I_s 和 I_r

分别为定、转子电流； ψ_s 和 ψ_r 分别为定、转子磁链矢量； R_r 为转子绕组电阻； L_s 为定子自感； L_r 为转子自感； L_m 为定转子之间互感。

忽略定子电阻和定子电流微分量等的影响，得 $U_s = j\omega_1(L_s - L_m^2/L_r)I_s + j\omega_1 L_m/L_r \psi_r = jX_d I_s + E_s$ (8) 其中有：

$$X_d = \omega_1(L_s - L_m^2/L_r) \quad (9)$$

$$E_s = j\omega_1 L_m/L_r \psi_r \quad (10)$$

由式(8)一式(10)可知， E_s 为 DFIG 定子侧内部电动势，且 E_s 与转子磁链 ψ_r 成正比，因此转子侧变流器可通过控制转子磁链以控制 E_s ，从而使得双馈电机定子从 E_s 向内等效为电压源，且 J_2 和 D_2 的存在使得定子侧具有了对功率和频率的惯量。

由式(6)和式(7)可得：

$$U_r = \frac{R_r}{L_r} \psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_{slip} \psi_r \quad (11)$$

根据式(11)设计转子侧变换器控制框图如图 6 所示。下标有 d, q 的变量为各电压、电流和磁链量在旋转坐标系下的交、直轴分量，上标有星号的为转子磁链在旋转坐标系下的交、直流分量的参考值。 $u_{ra}, u_{r\beta}$ 分别为转子侧变换器输出电压在两相静止坐标系下的值， S_{ra}, S_{rb}, S_{rc} 为转子侧变换器中各相桥臂的开关函数。

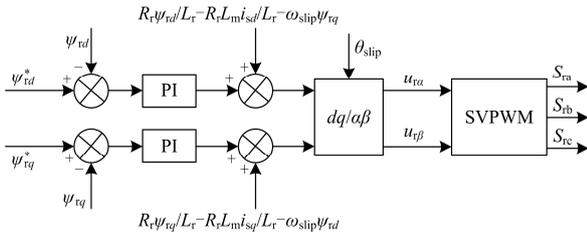


图 6 转子侧变换器控制框图

Fig. 6 Control scheme of rotor-side converter

3 仿真分析

3.1 仿真系统及参数

仿真实验按照图 1 所示结构，并在仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建模型，控制方式分别为采用传统矢量控制的电流源型控制和虚拟同步控制。

各部分参数按实际机组参数设定如下：风力机额定风速为 11.6 m/s；双馈感应电机额定功率为 2 MW，定子额定电压为 690 V，额定频率为 50 Hz，极对数 3，绕组折算系数为 0.3333，定子电阻为 0.004 89 p.u.，定子漏感为 0.0924 p.u.，转子电阻为 0.0055 p.u.，转子漏感为 0.0996 p.u.，互感为 3.954 p.u.，转动惯量为 $6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，初始转速为 1.14 p.u.；双 PWM 型变流器

参数如下：直流环节电容为 10 mF，直流环节电压额定值为 1100 V，电抗器电感为 0.4 mH，从控制器接收的驱动信号开关频率为 3 kHz；机组出口变压器变比为 35 kV/690 V，原边/副边为 Y/Δ 连接方式，变压器容量为 2.5 MVA；传输线型号为 LG-J35，长度为 10 km，线路阻抗为 $(9.1+j3.8) \Omega$ ；电网选用无穷大电源代替 10 kV 电网系统。

3.2 风电出力对并网电压的影响

负荷固定为 $(0.9+j0.3) \text{ MVA}$ ，电网等效阻抗为 $(11.8+j11.8) \Omega$ 。风速在 10 m/s 和 7.7 m/s 下接最大功率跟踪的有功功率分别为 1.35 MW 和 0.62 MW，机组采用电流源型控制且在不同功率因数 $(\cos\varphi)$ 下，得到 PCC 点电压如表 1 所示。

表 1 不同风速状况下 PCC 点电压

风速/ (m·s ⁻¹)	各功率因数下的 PCC 点电压/kV				
	cosφ=-0.95	cosφ=-0.98	cosφ=1	cosφ=0.98	cosφ=0.95
10	1.0498	1.0459	0.9971	0.9278	0.9156
7.7	0.9496	0.9477	0.9293	0.9097	0.906 65

由表 1 结果可知，风速较高时，PCC 点电压能控制在额定值上下 5% 的正常运行范围内。但当风速较低时，系统需要向配网补充有功，并网点电压会下降，甚至低于正常运行范围。考虑到目前机组功率因数在 -0.95~0.95 的限制，当风速低于 7.7 m/s 后，即使修改机组的功率因数，也不能使并网点电压维持在正常运行范围内。

3.3 负荷变化时的并网电压和机端电压对比

风速恒定为 10 m/s，电网阻抗为 $(11.8+j11.8) \Omega$ ，在 PCC 点所加负荷大小初始为 $(0.9+j0.3) \text{ MVA}$ ，在 2 s 时再突增 0.15 MW 的负荷，得到 PCC 点电压和风电机组的机端电压如图 7 所示。可以看出，系统突加负荷，导致 PCC 点电压出现明显突变。电流源型控制下的机端电压也出现了相应突变，但虚拟同步控制下的机端电压基本维持不变，体现了其电压源特性，所以这种控制下系统电压变化对机组的冲击比电流源型控制下的小。

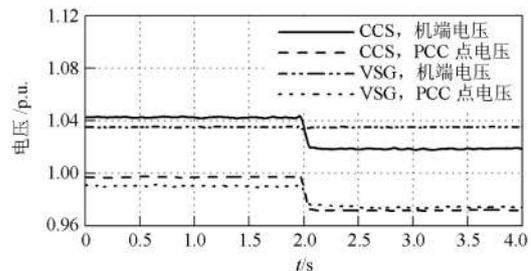


图 7 负荷变化时的电压

Fig. 7 Voltages when load changes

3.4 电网强度对并网电压稳定性的影响对比

由 3.3 节可知, 负荷突变导致系统潮流变化, 进而导致 PCC 点电压突变, 在与 3.3 节相同风速和负载条件下改变系统等效阻抗, 即在不同电网短路比下, 得到两种控制方式下 PCC 电压的相对变化量(变化量/额定值)如表 2 所示。可知在不同电网强度下, 虚拟同步控制更有利于抑制 PCC 点电压波动。

表 2 不同短路比下 PCC 点电压相对变化量

Table 2 Relative variation of V_{pcc} for different SCR			
控制方式	SCR=9	SCR=6	SCR=3
CCS	1.085%	1.484%	2.494%
VSG	0.81%	0.977%	1.213%

由前文分析可知, 低风速下, 电压稳定的临界短路比更低, 因此设定风速为 8 m/s, 当电网等效阻抗为 $(0.6+j0.6)$ p.u. 时, 两种控制下 PCC 点电压如图 8 所示。

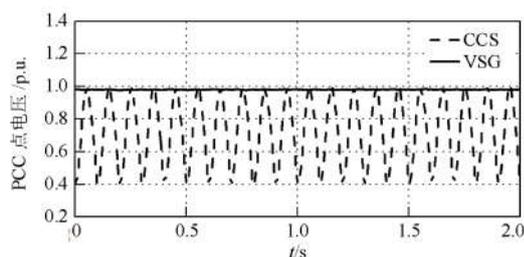


图 8 PCC 点电压

Fig. 8 Voltage of PCC

由图 8 可知, 在短路比为 1.18 的电网状况下, 机组在采用电流源型控制下的接入点电压已崩溃, 而采取虚拟同步控制时, 接入点电压依然能保持稳定, 因此风电机组的虚拟同步控制在风电并入弱电网时具有更强的电压稳定性。

3.5 两种控制方法对电网的惯量响应对比

比较两种控制方法对系统频率的支撑能力, 用汽轮发电机组替代无穷大电源加入仿真实验中, 发电机额定容量为 20 MVA, 额定有功为 16 MW, 额定无功为 12 Mvar, 额定电压为 10.5 kV, 额定频率为 50 Hz。

风速恒定为 9 m/s, 有功负荷和无功负荷初始分别为 1.5 MW 和 0.3 Mvar, 在 10 s 后突增 0.3 MW 的有功负荷, 两种控制下的系统频率和风电机组输出有功功率如图 9 所示。

负荷突增后, 机组在电流源型控制下的有功功率几乎无明显变化, 系统频率最低下降至 49.5 Hz。而机组在虚拟同步控制下由于具有虚拟惯量, 当电网频率变化时, 会快速提供约 0.12 MW 的有功输出, 对电网频率起到暂态支撑的作用, 因此可以减

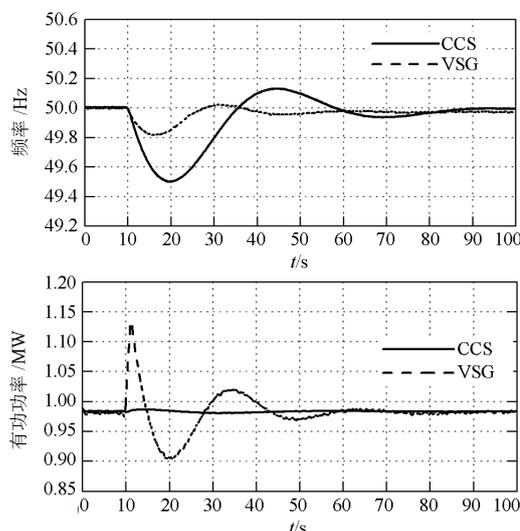


图 9 电网频率和风电机组输出的有功功率

Fig. 9 Frequency of the grid and active power

output of the wind turbine

小频率变化, 系统频率最低点为 49.8 Hz, 且更快趋于稳定, 体现了其对电网频率的支撑能力。

4 结论

针对风电机组采用电流源型控制方法并入弱电网所引发的电压失稳和缺乏惯量等问题, 本文研究适用于双馈风电机组的虚拟同步控制, 该控制方法可以参与电网电压、频率调节, 通过对比双馈风电机组电流源型控制和虚拟同步控制的特性, 主要结论如下:

(1) 分散式风电接入配电网时, 接入点电压受系统有功、无功潮流影响很大, 合理选择机组运行方式, 如功率因数控制, 可以在一定范围内改善电压质量。

(2) 机组采用电流源型控制方法时, 为保证接入点静态电压稳定, 要求短路比应大于 1.45, 并保留一定裕度, 而虚拟同步控制方法使机组在弱电网条件下具有更好的电压稳定性。

(3) 配电网内负荷冲击会造成系统电压发生突变, 电流源型控制下的机端电压也会突变, 虚拟同步控制下的机端电压则能维持恒定, 从而减小了对机组的冲击。

(4) 机组在电流源型控制下实时跟踪电网频率, 对电网提供频率支撑, 而虚拟同步控制可以对电网频率变化模拟惯量响应, 提供暂态支撑。

参考文献

- [1] 李超, 王洪涛, 韦仲康, 等. 含大型风电场的弱同步电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 96-103.

- LI Chao, WANG Hongtao, WEI Zhongkang, et al. Coordinated control of weakly-synchronized grid containing large wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 96-103.
- [2] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 风速波动时风电场动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(4): 497-502.
- CAO Na, YU Qun, DAI Huizhu. Dynamic character analysis of wind farm under wind fluctuation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2009, 30(4): 497-502.
- [3] 崔正湃, 王皓靖, 马锁明, 等. 大规模风电汇集系统动态无功补偿装置运行现状及提升措施[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1873-1878.
- CUI Zhengpai, WANG Haojing, MA Suoming, et al. Operation situation analysis and improvement measure study for dynamic reactive compensation equipment applied in large-scale wind power systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1873-1878.
- [4] 包宇庆, 李扬, 王春宁, 等. 需求响应参与大规模风电接入下的电力系统频率调节研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 32-37.
- BAO Yuqing, LI Yang, WANG Chuning, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 32-37.
- [5] 魏刚, 范雪峰, 张中丹, 等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响及对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.
- WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. Power system Protection and Control, 2015, 43(24): 135-141.
- [6] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 40-45.
- CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 40-45.
- [7] 刘学平, 刘天琪, 李兴源. 含风电机组的配电网无功优化补偿[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 130-135.
- LIU Xueping, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Optimal reactive power planning in distribution system with wind power generators[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 130-135.
- [8] 陈继明, 祁丽志, 孙名好, 等. 多场景下含风电机组的配电网无功优化的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 129-134.
- CHEN Jiming, QI Lizhi, SUN Mingyu, et al. Reactive power optimization for distribution network with multi-scenario wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 129-134.
- [9] 王克. 基于虚拟同步发电机的风力发电系统接口特性的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- WANG Ke. Research on interface characteristics of wind power generation system based on virtual synchronous generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [10] 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.
- LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its application in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603.
- [11] 孟建辉, 王毅, 石新春, 等. 基于虚拟同步发电机的分布式逆变电源控制策略及参数分析[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 1-10.
- MENG Jianhui, WANG Yi, SHI Xinchun, et al. Control strategy and parameter analysis of distributed inverters based on VSG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 1-10.
- [12] 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.
- WANG Sigeng, GE Baoming, BI Daqiang. Control strategies of grid-connected wind farm based on virtual synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(21): 49-54.
- [13] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
- ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [14] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [15] WANG Shuo, HU Jiabing, YUAN Xiaoming. 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.
- [16] ZHAO Yangyang, CHAI Jianyu, SUN Xudong. Virtual synchronous control of grid-connected DFIG-based wind turbines[C] // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015: 2980-2983.

收稿日期: 2016-05-31; 修回日期: 2016-07-20

作者简介:

王磊(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为风电机组并网运行与控制; E-mail: wl2014@sjtu.edu.cn

张琛(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为风电接入装置与并网技术;

李征(1961—), 女, 教授, 主要研究方向为发电、控制系统。

(编辑 魏小丽)