

# 不同风电机组对电网暂态电压稳定性的影响

夏正邦, 李培强, 揭璐琦, 林穿, 李俊男

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 针对负荷波动情况, 分析 3 种常见风电机组的结构特点; 利用 MATLAB 的电力系统分析工具箱 PSAT 建立了含风电场的 14 节点算例系统, 通过时域仿真研究了相同节点接入不同风电机组对电力系统电压稳定性的影响, 对 3 种机组及其系统的暂态电压稳定性进行了分析对比; 讨论了负荷增长方式的不同、风机接入方式的不同对风电并网点电压稳定性的影响。结果表明: 负荷增长倍数越大、负荷同时增长、风机分散接入加剧了系统电压的不稳定。

**关键词:** 负荷扰动; 时域仿真; 电压稳定; 风电机组

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2018)06-0572-06

## Analysis of effects of different wind turbines on the transient voltage stability of the power system

XIA Zhengbang, LI Peiqiang, JIE Luqi, LIN Chuan, LI Junnan

(School of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** In view of the load fluctuation, the structural characteristics of three common wind turbines were analyzed. The MATLAB power system analysis toolbox PSAT was used to establish a 14-node example system with wind farms was studied by Time domain simulation was used to study the effects of different wind turbines connected to the same node on the voltage stability of the power system. The transient voltage stability of the three units and their systems was analyzed and compared. Finally, the effects of different load growth modes and different fan access modes on the voltage stability of wind power grid-connected points were discussed. Results show that the larger the load growth multiple, the one-time increase of the load and the decentralized access of the fan, the greater instability of the system voltage.

**Keywords:** load disturbance; time domain simulation; voltage stability; wind turbines

近几年, 风力发电发展迅速, 但大量风电接入电网、工农业生产生活负荷不确定性增强以及负荷中心远离能源基地等现状, 使得系统电压稳定性问题越来越严重<sup>[1-2]</sup>。风机在向电网输送有功时, 也会从电网中吸收无功, 若电网中出现某扰动时, 电网不能提供足够的无功功率, 将会导致电压不稳定, 甚至失稳<sup>[3-4]</sup>。文献[5]建立了 DFIG 的

精确模型并改进了矢量控制方法, 研究了在电网电压骤降故障下提高风电机组并网运行的稳定性。文献[6]分析了双馈风机与直驱同步风电机组的数学模型, 在两区域系统研究了振荡模式和阻尼特性。文献[7-10]研究了 3 种常见风电机组基本结构, 建立了动态数学模型, 对不同机组在电网故障期间和故障后对电网暂态稳定性进行了

收稿日期: 2018-09-12

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01622)

第一作者简介: 夏正邦(1994-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统稳定性分析与控制。

通信作者: 李培强(1975-), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 研究方向: 电力系统运行与控制。

分析对比。文献[11]研究了双馈风电机组出力不同、风机接入点不同系统发生三相短路时对电网的影响,以及寻求风电场最佳接入系统容量。文献[12]采用多步高阶 Taylor 级数法,分析风速扰动以及电网内部出现断路器突然跳闸断线后的发电机功角、转速、电压幅值等的变化情况。文献[14]同时考虑负荷增长方式随机性和负荷出现增长节点的不确定性。本文基于上述研究基础,针对不同类型风电机组在负荷突增扰动下对系统的电压稳定性进行分析。

本文分析了3种风电机组的数学模型,利用 MATLAB 的电力系统分析工具箱 PSAT 建立了含风电场的14节点系统模型。从负荷增长的角度分析,通过接入双馈风机、永磁同步、恒速异步3种类型风电机组,对比分析机组对系统的电压稳定性的影响,并讨论了负荷不同增长方式、风机不同接入方式对系统电压稳定性的影响。

## 1 风电机组数学模型

### 1.1 风力机模型

风能利用系数方程如式(1)与(2)所示:

$$c_p = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4 \theta_p - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \theta_p} - \frac{0.035}{\theta_p^3 + 1} \quad (2)$$

风力机从风中捕获的功率可表示为:

$$P_w = \frac{\rho}{2} A_r c_p(\lambda, \theta_p) v_w^3 \quad (3)$$

式中: $\rho$ 为空气密度(15℃的海平面平均气压下为1.225 kg/m<sup>3</sup>); $\lambda$ 为叶尖速比; $A_r = \pi R^2$ 为风力机的桨叶扫风面积(m<sup>2</sup>), $R$ 为桨叶半径(m); $v_w$ 表示风速(m/s); $\theta_p$ 为桨距角。

### 1.2 恒速风电机组模型

恒速恒频风力发电机组(SCIG, squirrel cage induction generator)整个系统由桨叶、齿轮箱、异步发电机和无功补偿装置组成。由于定速风力机组大多采用定桨距风力机,因此风速变化下,机组定速运行。

轴系模型方程式为:

$$\begin{cases} \frac{d\omega_M}{dt} = \frac{T_m - T_s}{2H_l} \\ \frac{d\omega_G}{dt} = \frac{T_s - T_e - D_l\omega_G}{2H_g} \\ T_s = K_s\theta_s + D_s\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} = 2\pi f(\omega_M - \omega_G) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $H_l$ 、 $H_g$ 分别为风力机、发电机的惯性时间常数; $\omega_M$ 、 $\omega_G$ 分别为风力机转子与发电机转子的转速; $T_m$ 、 $T_e$ 分别为风力机械转矩与发电机电磁转矩; $T_s$ 为轴系转矩; $\theta_s$ 为两块质之间的相对角位移; $D_l$ 、 $D_s$ 分别为风力机转子与发电机转子的阻尼系数; $K_s$ 为轴的刚度系数; $f$ 为电网额定频率。

忽略定子侧的电磁暂态过程,异步电机方程可以表示为:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} - \theta_r \phi_{qr} + p\phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{qr} - \theta_r \phi_{dr} + p\phi_{qs} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_e = \phi_{qr} i_{dr} - \phi_{dr} i_{qr} \quad (6)$$

式中: $V_{qs}$ 、 $V_{ds}$ 分别为定子侧交、直轴电压; $R_s$ 、 $R_r$ 分别为定子、转子电阻; $\phi_{qs}$ 、 $\phi_{ds}$ 分别为定子侧交直轴磁通; $\phi_{qr}$ 、 $\phi_{dr}$ 分别为转子侧交、直轴磁通; $i_{qr}$ 、 $i_{dr}$ 分别为交、直轴电流; $T_e$ 为电磁转矩; $\theta_r$ 表示转子相对于同步旋转坐标的相对角度。

### 1.3 双馈异步风电机组模型

双馈风机(DFIG, Doubly fed Induction Generator)定子绕组直接连接在电网上,转子绕组由一个变频器与电网相连,该变频器通过直流母线电压使电网频率与机械频率相互解耦,使得风电机组能在变速情况下运行。风力发电系统中利用风力机将风能转化为机械能,发电机及其换流器控制系统将机械能转化为电能。变桨控制输出的桨距角参考值负责风力机的桨距角控制,MPPT(Maximum Power Point Tracking)控制输出的电磁功率参考值负责双馈风机换流器电磁功率控制。两个互相解耦的 PWM(Pulse Width Modulation)换流器控制模块,转子侧换流器控制机组的有功功率和定子侧无功功率,网侧换流器控制直流母线电压。

双馈发电机转速与定、转子绕组电流频率的

关系为

$$f_1 = f \pm f_2 \quad (7)$$

式中  $f_1$  为定子电流频率,  $f$  为同步发电机输出端电压的频率,  $f_2$  为转子电流频率。并入电网时, 若  $f_1$  为 50 Hz 时发电机同步转速与发电机转子本身转速的差值为常数, 则异步发电机定子绕组电势频率将保持在 50 Hz。

双馈异步电机电压方程为:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + p \varphi_{ds} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} p \varphi_{qs} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qs} + p \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + j(\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} + p \varphi_{qr} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $V_{dr}$ 、 $V_{qr}$  分别为转子侧交、直轴电压;  $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$  分别为定子电流 d、q 轴分量;  $\omega_s$ 、 $\omega_r$  分别为同步角速度, 转子旋转角速度;  $\varphi_{ds}$ 、 $\varphi_{qs}$  分别为定子磁链,  $\varphi_{dr}$ 、 $\varphi_{qr}$  分别为转子磁链。

磁链方程为:

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $L_{ss}$ 、 $L_{rr}$  分别为 d-q 轴坐标下定、转子漏感;  $L_m$  为 d-q 轴坐标下定转子等效绕组互感;  $L_s = L_{ss} + L_m$ ,  $L_r = L_{rr} + L_m$ 。

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\varphi_{qr} i_{dr} - \varphi_{dr} i_{qr}) \quad (10)$$

## 1.4 直驱同步风电机组的数学模型

永磁直驱风电机 (PMSM, permanent magnet synchronous motor) 的风力机与发电机通过轴系相连, 然后通过功率变换器与电网间接相连。风轮机产生的旋转力矩通过变流器变为电压幅值和频率恒定的交流电。在 d-q 轴坐标系中, 永磁同步机组的电压方程如式 (17) 所示。

$$\begin{cases} V_{ds} = -r_s i_{ds} + \omega_m x_q i_{qs} \\ V_{qs} = -r_s i_{qs} - \omega_m (x_d i_{ds} - \Psi_s) \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $r_s$  为定子电阻;  $\omega_m$  为永磁直驱风电机组的转速;  $x_d$  和  $x_q$  分别为永磁直驱风电机组的 d 轴电抗;  $\Psi_p$  为永磁磁通。

发电机发出的有功和无功为:

$$\begin{cases} P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (12)$$

直驱风电机组与电网实际交换的功率:

$$\begin{cases} P_c = v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \\ Q_c = v_{qc} i_{dc} - v_{dc} i_{qc} \end{cases} \quad (13)$$

机电方程如式 (14) 所示:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_m = (T_m - T_e) / (2 H_m) \\ T_e = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $H_m$  为永磁直驱风电机组的惯性时间常数。

## 2 暂态电压稳定性分析

### 2.1 暂态稳定判据

功角暂态稳定: 在交流输电系统受到大扰动后, 能维持系统中所有同步发电机同步运行的能力。系统受到大扰动后, 各同步发电机之间最大相对功角能小于  $180^\circ$ , 并且相对功角振幅逐渐衰减消失。

电压稳定: 在负荷突增或短路引起电压迅速下降, 系统中节点电压不低于 80% 额定电压, 且持续时间不超过 1.0 s, 电压振幅逐步衰减消失。

功率稳定: 在受到扰动后, 风机发出功率增大或减小, 并功率振幅逐步衰减消失。当风机发出的有功功率为 0 时, 表示风机脱网。

### 2.2 基于 PSAT 的暂态仿真算例

暂态电压的失稳几乎是由大扰动造成的, 负荷的大幅度增加是典型的大扰动之一。以上理论分析介绍 3 种风力发电系统模型结构及运行特性, 分析了风机的动态模型, 为下面的暂态仿真分析和研究其动态特性提供了仿真模型。

本文以时域仿真的角度分析暂态电压失稳的特性, 通过图 1 所示基于 PSAT 采用 IEEE14 节点系统模型算例进行修改并仿真研究。该系统中, 4 个 PV 节点, 8 个 PQ 节点, 5 台同步发电机, 并有自动励磁调节器和调速器, 其中节点 1 为平衡节点, 最终仿真出的数据和结论分析以标么值形式表示, 单位为 p.u., 功率基准值为 100 MVA, 风机接入点电压基准值为 18 kV。为便于仿真分析, 将整个风电场 30 台额定功率 2 MW 的机组等值一台风力发电机。发电机组发出的有功功率总和为 2 194.5 MW, 风力发电机发出的有功功率总和为 80 MW, 负荷吸收的有功功率总和为 2 150 MW, 该系统的风电渗透率为 3.64%。针对如下 3 种方案仿真: 方案 1, 将原系统中节点 7 的同步发电机改为同等装机容量不同类型的风电机组; 方

案 2, 风电场集中单点接入系统改为分散多点接入系统; 方案 3, 不同的负荷突增方式。

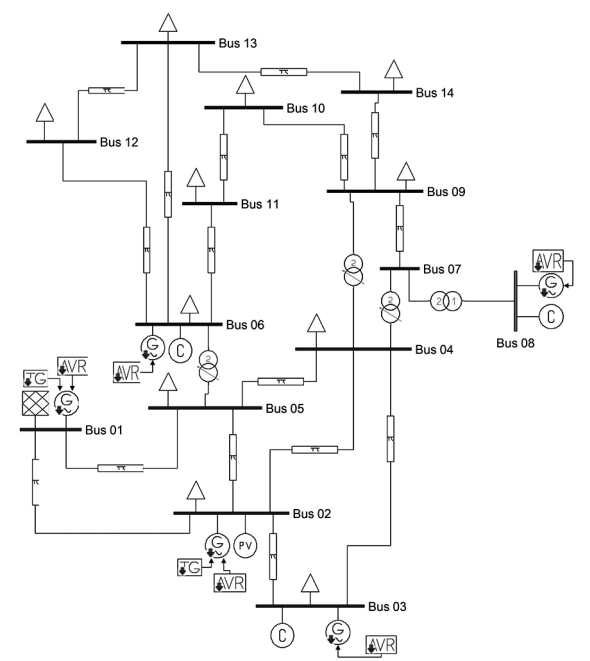


图 1 IEEE14 节点系统  
Fig.1 Node system of IEEE14

3 算例仿真分析

3.1 不同类型机组的暂态电压稳定性差异

负荷突增使得负荷吸收的功率与系统输出的功率不平衡, 易发生电压不稳定问题<sup>[13]</sup>。将 3 种类型的风电机组接入电网在负荷扰动下进行时域仿真分析。针对如下 3 种情况仿真: 算例 1, 节点 7 上的同步发电机组替换成同等容量的双馈风力发电机组; 算例 2, 节点 7 上的同步发电机组替换成同等容量的永磁直驱风电机组; 算例 3, 节点 7 上的同步发电机组替换成同等容量的恒速异步风力发电机组。

仿真过程中所有负荷在 3 s 后功率增加 10%, 仿真时长 20 s。图 2-图 4 给出了 3 个算例下相应的扰动响应曲线。图 2-图 4 中:  $\delta_{DFIG}$ 、 $\delta_{DDSG}$ 、 $\delta_{SCIG}$  分别为双馈风力发电机组、永磁直驱风电机组、恒速异步风力发电机组系统中同步发电机组 2 相对于同步发电机组 1 的功角;  $V_{DFIG}$ 、 $V_{DDSG}$ 、 $V_{SCIG}$  分别为双馈风力发电机组、永磁直驱风电机组、恒速异步风力发电机组接入系统的节点电压;  $P_{DFIG}$ 、 $P_{DDSG}$ 、 $P_{SCIG}$  分别分别为双馈风力发电机组、永磁直驱风电机组、恒速异步风力发电机组

发出的有功功率。

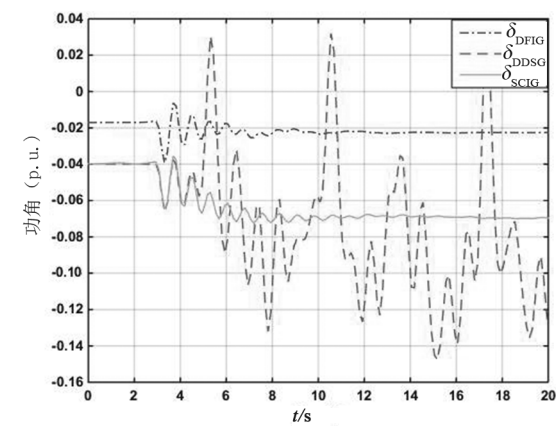


图 2 同步机组相对功角曲线  
Fig.2 Relative power angle curve of the synchronous unit

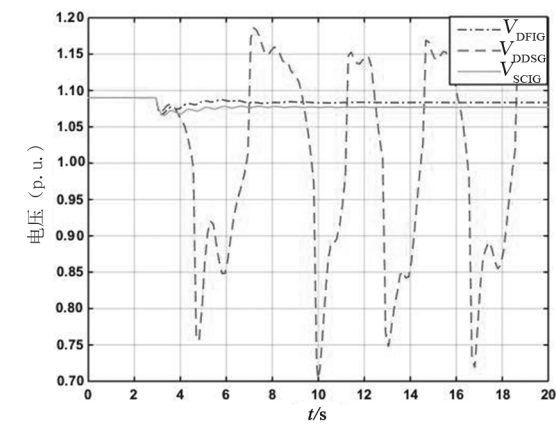


图 3 不同风电机组接入系统的节点电压  
Fig.3 Node voltage of different wind turbines connected to the system

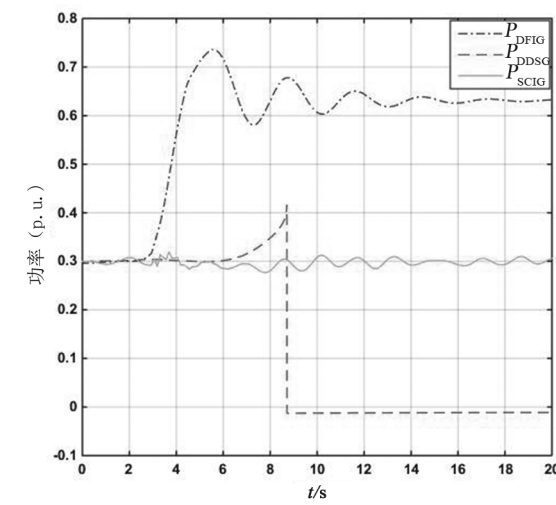


图 4 不同风电机组发出的有功功率  
Fig.4 Active power from different wind turbines



图 2-图 4 为 3 个算例的扰动响应曲线,在负荷突增干扰下,由图 2 可以看出,与接永磁直驱风电机组、恒速异步风力发电机组相比,接入 DFIG 时功角发生轻微摇摆,振荡幅度最小仅为 0.04 p.u.,收敛速度也更快,11 s 时曲线稳定,暂态特性最好。由图 3 可看出算例 A 和算例 C 中风机接入点电压的曲线发生轻微摇摆,并很快趋于稳定,算例 B 中母线电压曲线振荡明显。由图 4 可看出双馈风机迅速响应发出更多的有功功率,在 18 s 时趋于稳定,永磁直驱风电机组在 9 s 时脱离电网,恒速异步发电机组发出功率不平稳。不同负荷增加比例对 3 种风电机组本身及其对系统的暂态稳定性对比如表 1 所示。

表 1 不同负荷增加比例时 3 种风电机组本身及系统稳定性对比

Tab.1 Comparison of the three wind turbines themselves and system stability

类型	负荷突增倍数		
	1.1	1.2	1.3
双馈机组系统	稳定	稳定	失稳
双馈机组本身	稳定	稳定	失稳
直驱机组本身	失稳	失稳	失稳
直驱机组系统	失稳	失稳	失稳
恒速机组本身	稳定	稳定	失稳
恒速机组系统	稳定	稳定	失稳

双馈风电场相对于其他风电场在变化期间的稳定性较好。这是由于在电网中负荷突增期间,其他风机不能像双馈风机能实现有功功率和无功功率的解耦控制,能快速恢复风机出口电压并且减小振荡。

3.2 风电场接入方式对暂态电压稳定性的影响

上述是基于风电场集中单点接入系统的方案,基于此考虑风电场分散多点接入系统的方案,即通过多个并网点将风电机组分散的接入到系统中。以相同并网容量看风电不同接入方式下并网点电压最终恢复的稳定值,以同种接入方式下分析并网点电压最终恢复的稳定值与风电出力大小的关系。本节以两个分散点为例将系统内的 30 台风电机组等分为两部分,每点为 15 台风电机组,分别接入系统节点 7 处增加的 15 号节点和

16 号节点进行分析。

表 2 给出了风电场分散多点 and 单点接入系统以后,风电场并网点的母线电压随风电场有功出力的变化而变化的情况。表 2 可以看出在风电场输出有功功率的一定范围内,出力的不断增加,当风电场分散接入系统时,风电场并网点母线电压稳定时幅值不断下降,下降幅度 0.011 4 p.u.;当风电场集中单点接入时,风电场并网点母线电压稳定时幅值不断上升,上升幅度 0.007 8 p.u.,且当装机容量相同时集中单点接入系统较分散接入系统,并网节点电压的幅值高。但当风电有功出力增加到 90 MW 时,集中单点接入下母线电压从 1.085 6 p.u.下降至 1.081 4 p.u.,而分散接入下的母线电压已经失稳。在风电出力一定范围内,风电场所在节点电压随着风电机组出力增大而升高,且风电机组单点接入优于分散接入。

表 2 风电出力增长对系统暂态电压稳定性指标的影响

Tab.2 Effects of wind power output growth on system's transient voltage stability index

风电出力/MW	并网点电压(p.u.)	
	单点接入	分散接入
60	1.078 0	1.077 5
65	1.080 8	1.075 2
70	1.082 6	1.072 6
75	1.083 2	1.070 3
80	1.084 1	1.068 7
85	1.085 6	1.066 1
90	1.081 4	失稳

3.3 不同的负荷突增方式对暂态电压稳定性的影响

系统中所有负荷的波动都会对系统状态产生影响,为了分析不同的负荷突增方式对系统的影响,以上仿真场景都是假设系统中所有负荷在 3 s 时突增 10%。现分析场景 2 下负荷突增情况,系统中接入双馈风电机组,将 10%的负荷分 3 次投入,时间分别为 3、5、7 s。如图 5、图 6 所示,2 种突增方式下的系统动态过程稍有不同,场景 2 比场景 1 的最低电压高 0.012 p.u.,最终恢复时间和恢复到稳定幅值相同。

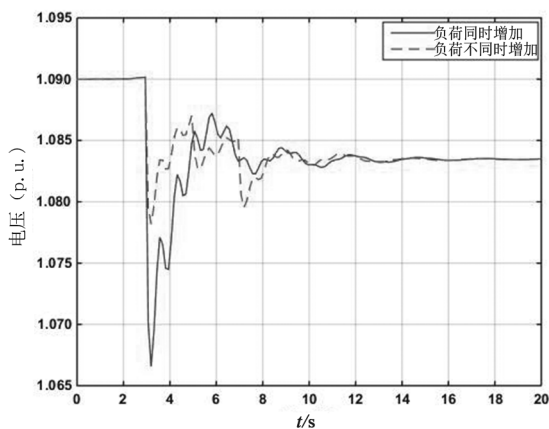


图 5 风机接入点的电压

Fig.5 Voltage of the fan access point

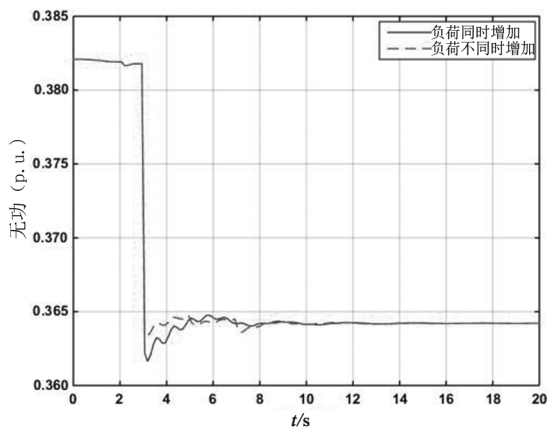


图 6 风机输出的无功功率

Fig.6 Reactive power output from the fan

出现这样的原因可以从负荷突增过程中风机功率的变化曲线图 6 得出。双馈风机会发出无

功,风机受到扰动发出的无功会突然减少。两种场景下,分 3 次增加时的风机发出的无功减少 0.019 p.u.,负荷同时增加时风机发出无功减少 0.020 5 p.u.。而且负荷吸收的无功是突然增加的,分 3 次增加时需求的无功较少。负荷需求的少提供的多,因此在负荷在不同时突增时最低电压更高点。可见,避免负荷大幅度一次性突增有利于系统暂态电压稳定性。

## 4 结语

为了研究在相同节点接入同等容量的异步风电机组、双馈风电机组与永磁同步风电机组对电力系统稳定特性的影响,采用动态时域仿真,在 MATLAB 的电力系统分析工具箱 PSAT 里 14 节点算例系统就不同类型机组对暂态稳定的影响进行了比较分析。得到以下结论:

1)不同机组在负荷突增扰动下引起的暂态稳定性不同,系统接入永磁直驱风电机组后,功角和电压曲线变得不稳定,风机脱网,系统趋于不稳定。双馈机组系统的暂态稳定性相对于其他风电场在变化期间的稳定性较好。

2)仿真结果证明了在电压稳定性分析过程中,风电机组单点接入优于分散接入。在风电出力一定范围内,风电场所在节点电压随着风电机组出力增大而升高。超出一定范围,电压会下降,甚至是失稳。

3)仿真结果显示系统中出现不同的突增方式,引起的动态过程稍有不同。负荷突增倍数分 3 次增加时的电压震荡幅度小些,有利于机组和系统的稳定性。

## 参考文献:

- [1] 王铭. 风光储接入对电力系统稳定性的影响分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [2] 姚亦章. 双馈风机接入对电力系统小干扰稳定性的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [3] 杨建斌. 大型风电场接入电网的动态特性仿真研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [4] 王毅, 朱晓荣, 赵书强. 风力发电系统的建模与仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 77-81.
- [5] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降故障下双馈风机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-27.
- [6] 李培强, 王继飞, 李欣然, 等. 双馈与直驱风电机组的小干扰稳定性对比分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 92-97.
- [7] 邢文琦, 晁勤. 含不同风电机组的风电电网仿真研究[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 103-106.
- [8] 曹娜, 李岩春, 赵海翔, 等. 不同风电机组对电网暂态稳定性的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 53-57.
- [9] 郝元钊, 李培强, 李欣然, 等. 风电机组对电力系统暂态稳定性影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 41-46.

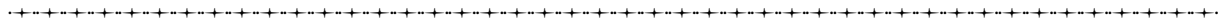
[4] BASS H. Algebraic K-theory [M]. New York: Benjamin, 1968.

[5] 张锦州. 范畴局部化与回路范畴的若干问题研究及应用[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.

[6] 冯清, 李长安. 回路范畴的平凡扩张与冲积[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 1-5.

[7] 沈倩芳. 推出范畴的性质[D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.

(责任编辑: 陈雯)



(上接第 577 页)

[10] 和萍, 文福拴, 薛禹胜, 等. 不同类型风电机组对小干扰和暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 23-29.

[11] 杨琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042-2047.

[12] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211-218.

[13] 秦文萍, 任琛, 韩肖清, 等. 考虑负荷波动极限的电力系统电压稳定性风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4102-4111.

[14] 白杨, 王鹏, 韩肖清, 等. 基于负荷不确定性建模的静态电压稳定性风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3470-3478.

[15] 卢锦玲, 徐超, 程晓悦, 等. 基于 DFIG 的变速风电机组对系统暂态稳定影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 39(10): 2780-2786.

(特约编辑: 黄家瑜)