

DOI: 10.7667/PSPC161358

基于阻抗比判据的永磁直驱风力发电系统 并网稳定分析方法

沈阳武¹, 葛云霞¹, 崔挺¹, 熊尚峰¹, 吴云亮², 李勇³, 邓小亮⁴

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510000;
3. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 4. 国网湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 考虑永磁直驱风力发电系统(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)的动态特性, 提出一种基于阻抗比判据的 PMSG 并网稳定性分析方法, 以提高 PMSG 并网稳定分析的准确性。首先, 基于阻抗比稳定分析原理, 推导含变换器系统的并网稳定判据。然后, 考虑 PMSG 的动态特性, 在建立状态空间方程的基础上推导出 PMSG 的小信号模型, 进而推导 PMSG 的输出阻抗表达式, 据此分析 PMSG 并网稳定分析方法且得出具体实现流程。最后, 利用 PSASP 分别搭建含 PMSG 的简单系统和 WSCC-9 节点仿真系统。仿真结果验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 永磁直驱风力发电系统; 阻抗比判据; 小信号模型; 稳定性; 电力电子变换器

A stability analysis method for the grid-connected permanent magnet synchronous generator based on impedance ratio criterions

SHEN Yangwu¹, GE Yunxia¹, CUI Ting¹, XIONG Shangfeng¹, WU Yunliang², LI Yong³, DENG Xiaoliang⁴

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China; 2. China Southern Power Grid Power Operation and Control Centre, Guangzhou 510000, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: A method is proposed to improve the accuracy of stability analysis for a grid-connected permanent magnet synchronous generator (PMSG) system based on the impedance ratio criterion, which considers the dynamic characteristics of PMSGs. Firstly, stability analysis theory for the system with electronic converters is deduced using the impedance ratio criterion. And then, the small signal model of a PMSG is established including its dynamic characteristics. Based on the small signal model, the output impedance of a PMSG is derived. Next, the stability analysis method for the grid-connected PMSG is obtained. At last, the simulation results on a PMSG simple system and the WSCC-9 bus system using PSASP verify the effectiveness and accuracy of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377001, No. 61233008 and No. 51520105).

Key words: magnet synchronous generator (PMSG); impedance ratio criterion; small signal model; stability; power electronic converter

0 引言

随着全球经济的不断发展, 对能源的需求量越来越大。传统石油、煤炭等不可再生资源难以满足人类社会的可持续发展, 而以风能为代表的新能源

在世界范围内受到广泛重视和大力发展。其中, 风能利用和风力发电技术是最为成熟的技术之一。

风力发电机组按照转速的运行方式可分为恒速风电机组和变速风电机组。其中, 变速风电机组具有高效、可靠和机械应力小等优点, 成为目前国内国外风力发电的主流机型^[1-2]。变速风电机组主要有两种: 双馈型风电机组(Double Fed Induction Generator, DFIG)^[3]和永磁直驱型风电机组(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)。与 DFIG 相比, PMSG

基金项目: 国家自然科学基金(51377001, 61233008, 51520105); 湖南省电力公司科技项目(5216A516002C, 5216A515002V); 科技部国际合作项目(2015DFR70850)

在结构和电气响应特性等方面具有较大的优势，成为风力发电机组发展的趋势。在结构上，PMSG 的风力机直接驱动发电机转子旋转，没有变速环节，既降低了成本，也消除了变速箱带来的噪声污染；同时，发电机转子采用永磁材料，省去了励磁绕组和相应的励磁电流回路，使得转子结构简单，不需要外部提供励磁，提高了机组的效率^[4]。在电气响应特性上，PMSG 采用全功率变换器接入电网，不仅实现了功率的解耦控制^[5]，而且降低了与电网的耦合性，提高了机组抵抗电网扰动的能力。

PMSG 通过一组背靠背的电力电子变换器接入电网后，将引起电力系统电压和功率的波动、瞬态超过过大产生的冲击大和系统稳定性下降等问题^[6-7]。因此，有必要就 PMSG 并网系统的稳定性的分析和判断展开研究。现有文献对于 PMSG 并网稳定性的分析大都局限于机组并网后的外特性，忽略了 PMSG 本身的动态特性。文献[8-9]分析了风电并网对电压稳定的影响，指出了风速的不稳定性导致风电场输出功率的波动是影响系统稳定的主要因素。文献[10-11]提出了一种 PMSG 改进型功率控制方法，以抑制系统低频振荡。文献[12-14]建立了 PMSG 并网系统的小信号模型，推导了其特征值矩阵并进行特征值灵敏度和动态性能分析。与传统电源相比，PMSG 并网后，系统会有“源效应”和“负载效应”^[15]，即非理想电源或负载与变换器级联后，系统的稳定性发生变化。在 PMSG 经变换器与电网其他元件(电源和负载)级联后，系统可能出现不满足稳定要求的情况。因此，在 PMSG 并网系统稳定分析中，必须考虑风电机组的动态特性。

本文以 PMSG 并网系统为研究对象，提出一种 PMSG 并网系统动态稳定分析和判别方法。首先，基于阻抗比稳定分析原理，推导含变换器系统的并网稳定判据。然后，基于 PMSG 的动态模型，建立基于状态空间方程描述的 PMSG 小信号模型，推导 PMSG 的输出阻抗，分析影响该阻抗的相关参数，得到基于阻抗比判据的 PMSG 并网稳定分析方法和实现流程。最后，利用含 PMSG 的简单系统和 WSCC-9 节点系统，仿真验证所提方法的有效性和准确性。

1 基于阻抗比判据的稳定分析原理

随着大量分布式电源经电力电子变换器接入电网，各分布式电源的相互作用易导致电力系统稳定性和动态性能降低，甚至造成系统失稳^[16-18]。

如图 1 所示，含分布式电源的系统拓扑结构主要由电源、变换器和负载组成，常见的连接方式有变换器级联和变换器并联等。

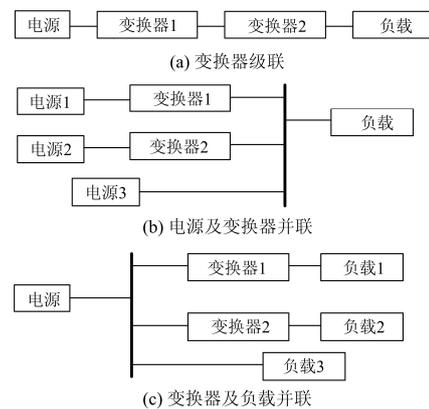


图 1 含电力电子变换器的系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of systems with power electronic converters

对于一个两级级联系统，根据 Middlebrook 提出的阻抗比判据^[19]，系统能够保持稳定的条件是在所有频段满足式(1)，即

$$|Z_o| \leq |Z_m| \quad (1)$$

式中： Z_o 是电源侧子系统的输出阻抗； Z_m 是负载侧子系统的输入阻抗。

但该判据是一个充分条件，即要求整个频段段的阻抗比值满足要求，具有一定的保守性，不能准确反映系统的稳定水平。此外，在系统设计时，会造成滤波器、电容器所需容量增大等。为了克服 Middlebrook 判据的保守性，本文利用系统输出和输入阻抗比的 Nyquist 曲线，提出一种含变换器系统的并网稳定分析方法。

以下以两级级联系统为例，推导基于系统输入输出阻抗比的 Nyquist 曲线稳定分析原理。如图 2 所示，两级联系统的传递函数表示为

$$F = \frac{\hat{u}_{o2}}{\hat{u}_{in1}} = \frac{F_1 F_2}{1 + \frac{Z_o}{Z_m}} = \frac{F_1 F_2}{1 + T_m} \quad (2)$$

式中： F_1 、 F_2 分别是源子系统和负载子系统的传递函数； T_m 称为次环路增益或小环路增益，且 $T_m = Z_o/Z_m$ ； \hat{u}_{in1} 、 \hat{u}_{o2} 分别是输入电压和输出电压。

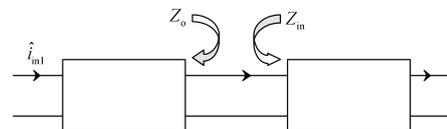
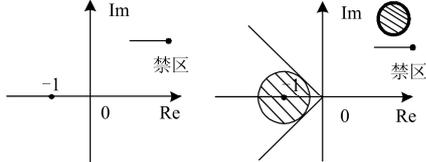


图 2 两级级联系统

Fig. 2 Two-stage cascade connection system

假设子系统 F_1 、 F_2 是稳定的，根据 Nyquist 稳定判据^[20]，整个系统保持稳定的充要条件是当且仅当 T_m 的 Nyquist 曲线不进入图 3(a)中所示的禁区(即

射线 $x \leq -1, y=0$ 。一般地, 系统稳定运行需要保持一定的稳定裕度。根据 Nyquist 稳定判据, 稳定裕度定义为 T_m 的 Nyquist 曲线与 $(-1, 0)$ 点的最短距离。具体地, 如图 3(b) 所示, 以 $(-1, 0)$ 为圆心划定一个圆 O, 禁区包括圆 O 所围成的区域以及射线 $x \leq -1, y=0$ 。系统输入输出阻抗比的 Nyquist 曲线不进入该禁区, 即能保持一定的稳定裕度。



(a) 小信号稳定禁区 (b) 考虑稳定裕度的稳定禁区
图 3 系统稳定的禁区

Fig. 3 Forbidden zone for system stability

PMSG 是典型的含变换器系统, 将 PMSG 作为源子系统, 电网侧等效为负载子系统, 便可利用本节所提基于输出和输入阻抗比的 Nyquist 曲线稳定分析方法判断 PMSG 并网的稳定性。

2 PMSG 的输出阻抗与并网稳定分析方法

2.1 PMSG 的数学模型

PMSG 的结构如图 4 所示, 主要包括风力机、永磁同步发电机、机侧变换器和网侧变换器等。控制系统包括最大功率跟踪控制、机侧变换器控制和网侧变换器控制等。当风力机转速小于额定转速时, 通过调节叶尖速比实现最大功率跟踪; 当转速超过额定转速时, 通过调节桨距角降低风能利用系数。机侧变换器控制永磁同步电机, 实现转速调节及机侧电流的闭环控制; 电网侧变换器实现直流电压和网侧电流的闭环控制^[21-24]。

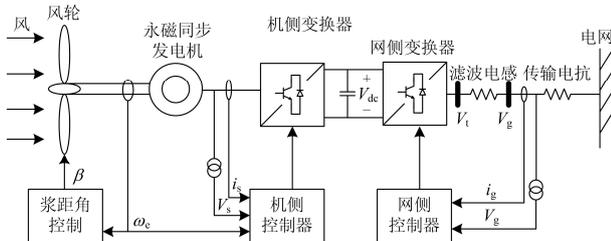


图 4 PMSG 并网结构图

Fig. 4 Topology of a grid-connected PMSG

1) 风力机模型

风力机获取的机械功率与有效风速、转速以及结构参数相关, 其表达式为

$$P_w = T_w \omega_w = 0.5 \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v_w^3 \quad (3)$$

其中:

$$T_w = 0.5 \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) v_w^2 / \lambda \quad (4)$$

式中: P_w 是获取的风能功率(单位 W); T_w 是风力机的输入转矩; ω_w 是风力机转子的转速; ρ 是空气密度(单位 kg/m^3); R 是风轮半径(单位 m); λ 是叶尖速比; β 是桨距角(单位度); v_w 是风速(单位 m/s); C_p 是风能转化效率, 变速风机的转速可以在较宽的范围内进行调节, 使得叶尖速比保持在最优值, 从而使得风能转化效率最大, C_p 的表达式为

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_1} - 0.4\beta - 5 \right) e^{12.5/\lambda_1} \quad (5)$$

式中, $\lambda_1 = 1 / \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)$ 。

2) 永磁同步发电机模型

忽略定子铁芯磁阻、发电机内部涡流和磁滞损耗, 利用转子磁场定向矢量控制技术, dq 坐标系下永磁同步发电机的数学模型为

$$\begin{cases} V_{ds} = -L_d \frac{di_{ds}}{dt} - R_s i_{ds} + L_q i_{qs} \omega_e \\ V_{qs} = -L_q \frac{di_{qs}}{dt} - R_s i_{qs} - L_d i_{ds} \omega_e + \psi \omega_e \end{cases} \quad (6)$$

$$T_e = 1.5 n_p \psi i_{qs} \quad (7)$$

$$P_s = 1.5 (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \quad (8)$$

$$Q_s = 1.5 (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \quad (9)$$

式中: V_{ds} 、 V_{qs} 、 i_{ds} 、 i_{qs} 分别为机侧端口电压和电流的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感; ψ 是永磁体磁链; T_e 为电磁转矩, ω_e 为发电机的电角速度, 且 $\omega_e = n_p \omega_w$, n_p 是定子极对数; P_s 、 Q_s 分别为发电机有功和无功功率。

发电机的转子运动方程为

$$J_{ed} \frac{d\omega_e}{dt} = T_w - T_e \quad (10)$$

式中, J_{ed} 为机组的等效转动惯量。

3) 变换器模型及其控制策略

PMSG 的变换器采用矢量控制技术实现有功无功的解耦控制, 机侧变换器和网侧变换器的控制结构见文献[20-22]。

机侧变换器的数学模型可用永磁同步发电机的定子电压方程(6)表示。

网侧变换器在 dq 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} V_{dg} = V_{dt} - L_f \frac{di_{dg}}{dt} - R_f i_{dg} + L_f i_{qg} \omega \\ V_{qg} = V_{qt} - L_f \frac{di_{qg}}{dt} - R_f i_{qg} + L_f i_{dg} \omega \\ CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = 1.5 (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} - V_{dt} i_{dg} - V_{qt} i_{qg}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_{dt} 、 V_{qt} 分别为网侧变换器电压 d 、 q 轴分量; V_{dg} 、 V_{qg} 、 i_{dg} 、 i_{qg} 分别为电网电压和电流的 d 、 q 轴分量; R_f 、 L_f 分别为网侧滤波电阻和电感; ω 为电网频率。

当 PMSG 采用单位功率因数控制时, q 轴电压为 0, 则网侧变换器注入电网的功率为

$$\begin{cases} P_g = 1.5(V_{dg}i_{dg} + V_{qg}i_{qg}) = 1.5V_{dg}i_{dg} \\ Q_g = 1.5(V_{qg}i_{dg} + V_{dg}i_{qg}) = 1.5V_{dg}i_{qg} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_g 、 Q_g 分别为网侧有功和无功功率。

2.2 PMSG 的输出阻抗

本节在 PMSG 数学模型的基础上, 建立相应的状态方程, 求取 PMSG 的等效输出阻抗。由于变换器控制响应速度快(毫秒级), 而本文主要考虑 PMSG 并网的动态稳定问题(秒级), 故可认为变换器的控制特性为理想情况。为反映 PMSG 并网动态特性的主要相关因素, 可不计其快速衰减和高频模态部分, 建立简化的降阶模型。选取 $\Delta x = [\Delta\omega_e, \Delta i_{dg}, \Delta V_{dc}]$ 为状态变量, $\Delta u = [\Delta V_{dg}, \Delta v_w]$ 为控制变量, 输出变量为 $\Delta z = [\Delta i_{ds}, \Delta i_{qs}]$ 。

此外, 在 PMSG 并网稳定性分析中, 采用如下通用处理方式。

1) 忽略定子电阻, 同步发电机电压方程式(7)简化为

$$\begin{cases} V_{ds} = L_q i_{qs} \omega_e \\ V_{qs} = -L_d i_{ds} \omega_e + \psi \omega_e \end{cases} \quad (13)$$

2) 网侧变换器控制利用平均模型, 即在式(11)中, 有

$$\begin{cases} V_{ds} = S_{d1} V_{dc} \\ V_{qs} = S_{q1} V_{dc} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} V_{dt} = S_{d2} V_{dc} \\ V_{qt} = S_{q2} V_{dc} \end{cases} \quad (15)$$

式中, S_{d1} 、 S_{q1} 、 S_{d2} 、 S_{q2} 分别是机侧和网侧变换器 d 、 q 轴的输出占空比。

3) 当网侧变换器单位功率因数输出时, q 轴电流给定值为 0。

基于上述 3 点, 联合式(3)、式(4)、式(6)、式(11)、式(13)一式(15), 线性化后得到状态方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_e \\ \Delta \dot{i}_{dg} \\ \Delta \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & & \\ & a_{22} & a_{23} \\ & a_{32} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_e \\ \Delta i_{dg} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{dg} \\ \Delta v_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{12} \\ c_{31} & c_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{qs} \end{bmatrix} \quad (16)$$

输出方程为

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ds} \\ \Delta i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{13} \\ d_{21} & 0 & d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_e \\ \Delta i_{dg} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\rho \pi R^4 v_{w0} e^{-12.5(1/\lambda_0 - 0.035)}}{J_{ed}} [(159.5/\lambda_0^4) - (37.9775/\lambda_0^3) + (0.9966/\lambda_0^2)] \\ a_{22} &= -\frac{R_f}{L_f}, a_{23} = \frac{S_{d2}}{L_f}, a_{32} = -\frac{3S_{d2}}{2C} \\ b_{12} &= \frac{\rho \pi R^3}{J_{ed}} e^{-12.5(1/\lambda_0 - 0.035)} [(25.52/\lambda_0^2 - 1.9932/\lambda_0) v_{w0} - (159.5/\lambda_0^4 - 37.9775/\lambda_0^3 + 0.9966/\lambda_0^2) r \omega_e] \\ b_{21} &= -\frac{1}{L_f}, c_{12} = \frac{\psi}{J_{ed}}, c_{31} = \frac{3S_{d1}}{2C}, c_{32} = \frac{3S_{q1}}{2C} \\ d_{11} &= \frac{\psi - L_d i_{ds0}}{L_d \omega_{e0}}, d_{13} = \frac{S_{q1}}{L_d \omega_{e0}}, \\ d_{21} &= -\frac{i_{qs0}}{\omega_{e0}}, d_{23} = \frac{S_{d1}}{L_q \omega_{e0}} \end{aligned}$$

将式(17)代入式(16), 根据向量矩阵计算并化简可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega_e \\ \Delta i_{dg} \\ \Delta V_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{dg} \\ \Delta v_w \end{bmatrix} \quad (18)$$

利用式(18)得出 PMSG 的输出阻抗表达式为

$$Z_O = \frac{\Delta V_{dg}}{\Delta i_{dg}} = \frac{1}{G_{21}} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (19)$$

式中:

$$\begin{aligned} N(s) &= s^3 + \left(\frac{R_f}{L_f} + \frac{\psi i_{qs0}}{J_{ed} \omega_{e0}} - a_{11} - \frac{3S_{d1} S_{q1}}{CL_d \omega_{e0}} \right) s^2 + \\ & \left[a_{11} \left(\frac{3S_{d1} S_{q1}}{CL_d \omega_{e0}} - \frac{R_f}{L_f} \right) + \frac{3S_{d2}^2}{2CL_f} - \frac{R_f}{L_f} \left(\frac{3S_{d1} S_{q1}}{CL_d \omega_{e0}} - \frac{\psi i_{qs0}}{J_{ed} \omega_{e0}} \right) \right] - \\ & \frac{3\psi S_{d1} (S_{d1} \psi - S_{d1} L_d i_{ds0} + S_{q1} L_d i_{qs0})}{2CJ_{ed} L_d^2 \omega_{e0}^2} s + \\ & a_{11} \left(\frac{R_f}{L_f} \frac{3S_{d1} S_{q1}}{CL_d \omega_{e0}} - \frac{3S_{d2}^2}{2CL_f} \right) + \frac{3S_{d2}^2 \psi i_{qs0}}{2CL_f J_{ed} \omega_{e0}} - \\ & \frac{3R_f \psi S_{d1} (S_{d1} \psi - S_{d1} L_d i_{ds0} + S_{q1} L_d i_{qs0})}{2CL_f J_{ed} L_d^2 \omega_{e0}^2} \\ D(s) &= \frac{1}{L_f} s^2 + \frac{1}{L_f} \left(a_{11} - \frac{\psi i_{qs0}}{J_{ed} \omega_{e0}} - \frac{3S_{d1} (\psi - L_d i_{ds0} + S_{q1})}{2CJ_{ed} L_d^2 \omega_{e0}^2} \right) s + \\ & \frac{3\psi S_{d1} (S_{d1} \psi - S_{d1} L_d i_{ds0} + S_{q1} L_d i_{qs0})}{2CL_f J_{ed} L_d^2 \omega_{e0}^2} - a_{11} \frac{3S_{d1} S_{q1}}{CL_f L_d \omega_{e0}} \end{aligned}$$

由式(19)可知, PMSG 输出阻抗与风机结构参数 R_f 、 L_f 、 L_d 、 C 、 ψ 、 J_{ed} , 运行参数 i_{ds0} 、 i_{qs0} 、 S_{d1} 、 S_{q1} 、 S_{d2} 、 S_{q2} 、 ω_e 及外部输入参数 v_w (包含在 a_{11} 中) 等相关。当 PMSG 的构参数一定时, 根据系统实时运行状态, 可求出其输出阻抗的具体形式。

2.3 基于阻抗比判据的 PMSG 并网稳定分析方法与实现流程

基于阻抗比判据的 PMSG 并网稳定分析方法首先利用式(19)得到 PMSG 的等效输出阻抗, 并进一步求取电网侧等效输入阻抗(传递函数形式); 然后求取输出和输入阻抗比 $T_m(T_m=Z_o/Z_{in})$ 的 Nyquist 曲线; 最后依据 Nyquist 稳定判据, 判断 PMSG 并网的稳定性。当阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线与禁区(即射线 $x \leq -1, y=0$, 如图 3(a)所示)不相交时, 系统保持稳定; 当阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线与禁区相交时, 系统失去稳定; 当阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线仅与点(-1, 0)相交时, 系统临界稳定。一般地, 为保持一定稳定裕度, 禁区选为图 3(b)所示的阴影部分区域。

所提稳定分析方法具体实现流程如下:

1) 获取 PMSG 和电网的运行参数和模型参数等。PMSG 的模型参数主要有 R_f 、 L_f 、 L_d 、 C 、 ψ 、 J_{ed} 等, 运行参数有 i_{ds0} 、 i_{qs0} 、 ω_e 、 v_w 等; 电网侧元件主要结构参数包括线路、变压器以及常规机组的模型参数, 运行参数有节点电压、有功功率和无功功率等。

2) 将 PMSG 运行参数和结构参数代入式(19), 求取 PMSG 并网端口等效输出阻抗 Z_o 。

3) 根据电网各元件的模型参数和运行参数, 利用戴维南等值原理^[25]求出 PMSG 并网处网侧的等效输入阻抗 Z_{in} 。

4) 求取输出和输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线, 判断该曲线与禁区(如图 3(a)所示, 即射线 $x \leq -1, y=0$)的关系。如果该曲线与禁区相交, 则系统失稳; 反之, 系统保持稳定。

3 算例分析

本节利用简单系统和 WSCC-9 节点系统仿真验证所提方法的有效性。简单系统的结构如图 5 所示。WSCC-9 节点系统的结构如图 6 所示, 并假定在该系统的节点 Gen3 接入额定容量为 60 MW 的 PMSG 型风电场, 其中单台风机的额定容量为 1.5 MW, 风机模型参数见附录表 2 所示。

3.1 简单系统

本节利用简单系统, 在电网侧不同输入阻抗下, 将本文所提基于输出输入阻抗比的 PMSG 并网稳定分析方法与传统 PV 曲线法对比, 验证所提方

法的有效性。仿真分析中, 系统基准容量取 PMSG 的额定功率, 即 1.5 MVA。

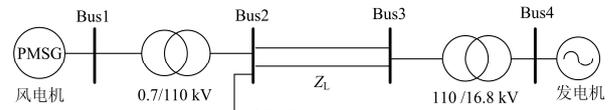


图 5 简单仿真系统

Fig. 5 Simple simulation system

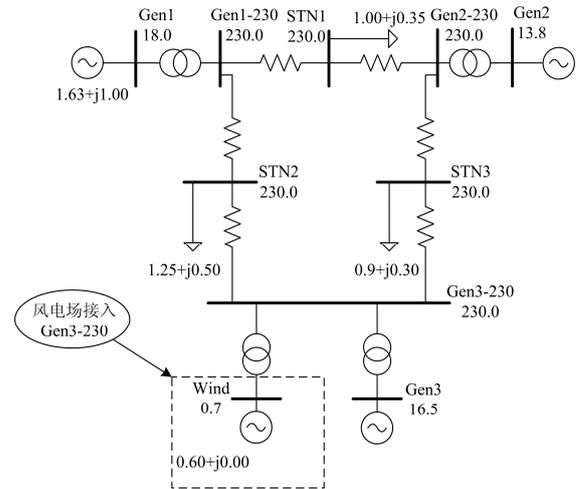
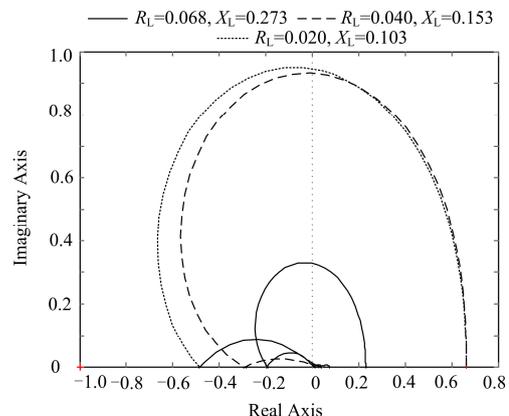


图 6 含一台等值风机的 WSCC-9 节点系统

Fig. 6 WSCC-9 bus system with an equivalent wind turbine

系统初始条件如下: PMSG 有功出力为 0.2 p.u., 负荷功率为 $1.0+j0.2$ p.u.; 普通发电机有功出力随着系统不同运行情况发生变化。

三种不同输入阻抗下, 系统输入输出阻抗比的 Nyquist 曲线和节点的 PV 曲线变化如图 7 所示, 同时系统的稳定结果如表 1 所示。当输入阻抗为 $0.068+j0.273$ p.u. 时, 简单系统输出输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线与点(-1, 0)的最小距离 L_{min} 约为 0.75, 系统稳定性较好; 而 PV 曲线法得到的极限功率 P_{max} 为 2.15 p.u.。当输入阻抗为 $0.020+j0.103$ p.u. 时, L_{min} 约为 0.3, P_{max} 为 1.95 p.u.。由此可见, 随着输入阻



(a) Nyquist 曲线图

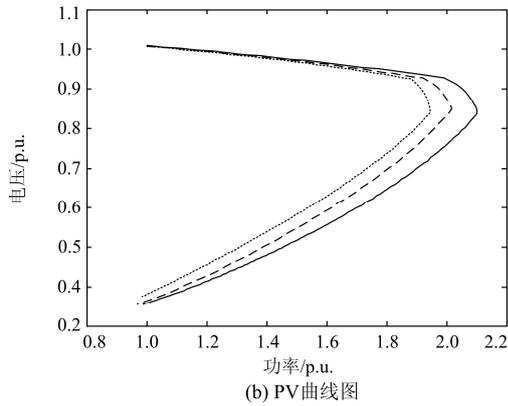


图 7 简单系统仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the simple system

表 1 三种不同输入阻抗的简单系统稳定情况
Table 1 Stability of the simple system with three different input impedances

输入阻抗/p.u.	阻抗比法	PV 曲线法
	(Nyquist 曲线与点(-1,0)的距离 L_{min})	(PV 曲线极限功率 P_{max} /p.u.)
0.068+j0.273	0.75	2.15
0.040+j0.153	0.4	2.01
0.020+j0.103	0.3	1.95

抗的减小, L_{min} 逐渐减小, P_{min} 也减小, 系统稳定性逐渐下降。本文所提方法与 PV 曲线法判断 PMSG 并网稳定性具有一致性和有效性。

3.2 WSCC-9 节点系统

3.2.1 风电场等值为一台风机

本节利用 WSCC-9 节点系统, 将风电场等值为一台风机, 验证本文所提基于输出和输入阻抗比的 PMSG 并网稳定分析方法比传统 PV 曲线法能更准确判断系统的稳定性。仿真分析中, 系统基准容量取 100 MVA。

风电场运行环境保持不变, 当母线 STN2 的负荷有功功率分别增加至 1.6 p.u.、2.0 p.u.和 2.3 p.u.时, 风电场输出和输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线如图 8 所示。

从图 8 可见, 随着母线 STN2 负荷功率的增加, T_m 的 Nyquist 曲线与点(-1, 0)的最小距离 L_{min} 逐渐减小, 系统的稳定裕度越小; 当负荷有功功率增加至 2.3 p.u.时, T_m 的 Nyquist 曲线经过点(-1, 0), 系统失去稳定。图 9 给出了母线 STN2 的 PV 曲线, 由图可知其稳定极限功率约为 2.45 p.u.。

当 $t=1$ s 时, 母线 STN2 的负荷功率(初始值为 1.25+j0.5 p.u.)开始增加, 增加速度为 0.023+j0.0092 p.u./s; 当 $t=50$ s 时, 负荷停止增加并保持不变(最终

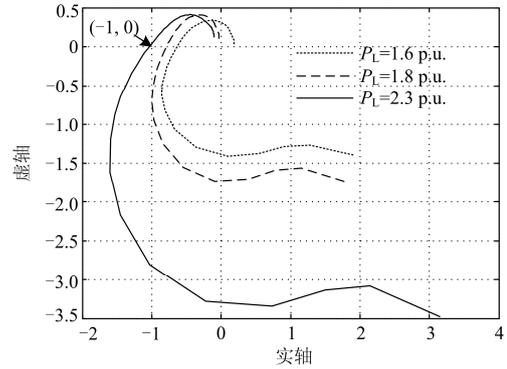


图 8 一台等值风机的输出和输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线

Fig. 8 Nyquist curve of T_m with an equivalent wind turbine

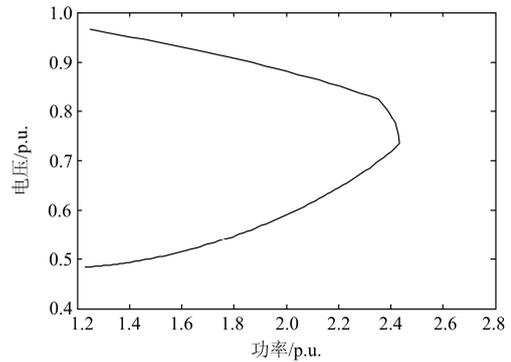


图 9 母线 STN2 的 PV 曲线

Fig. 9 PV curve of bus STN2

负荷功率为 2.4+j0.96 p.u.), 仿真时间为 60 s。图 10 给出了在上述仿真设置下负荷母线 STN2 的电压变化曲线。由此图可见, 母线 STN2 电压持续跌落; 当 $t=45$ s 时, 电压低于 0.8 p.u., 最终失去稳定。因此, 本文所提基于输出和输入阻抗比的 PMSG 并网稳定分析方法比传统 PV 曲线法能更准确地判断系统的不稳定运行状态。

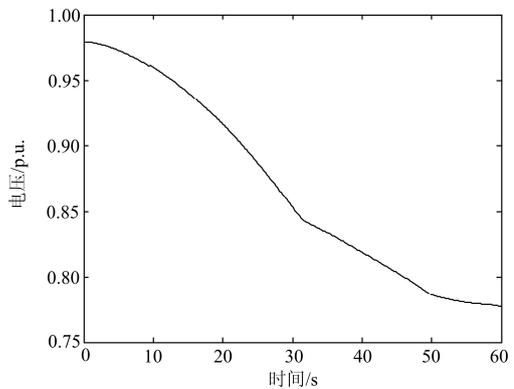


图 10 母线 STN2 的电压变化曲线

Fig. 10 Voltage curve of bus STN2

3.2.2 风电场等值为 3 台风机

通过对风电场输出功率与输入风速关系的分析, 且考虑风电机组在不同风速情况下风能利用系数不同的特点, 在实际应用中, 我们将风能利用系数描述为风速的分段函数并将其作为权值对风速加权等值。另外, 在风电场中, 风力机从吹向叶片上的风速中获得能量, 后排的风力机获得的风速大小会受到前排风力机的影响, 产生尾流效应。尾流效应的大小与风电场的排列方式、风力发电机之间的距离以及地表粗糙程度等因素有关。由于风力发电机间距相对较大, 当风速变化时, 每台风力发电机接收变化风速的时间不同, 若要精确地描述风力发电场的等效模型, 减小尾流效应的影响, 在建立等效模型时还需要考虑风速的时滞效应。

风电场的模型简化原则就是将处于相同或相近运行点的机组进行合并处理, 模拟相关的风力发电机组群。风电场机组的运行情况主要由风速决定, 风速不同将直接影响风力发电机组的有功功率、转速和电压。

本文运用同调等值法, 考虑风速产生的尾流效应和时滞效应, 对大型风电场中不同型号的风力发电机组进行区域划分, 并利用加权等值法以及风电场电气接线等效模型, 将同一区域的风力发电机等值为一台风力机模型。结合本文具体算例情况, 最终将算例中的 40 台 PMSG 机组等值为 3 台运行风速分别为 7 m/s、14 m/s 和 20 m/s 且对应输出功率分别为 15 MW、30 MW 和 15 MW 的风机模型。具体算例模型如图 11 所示。

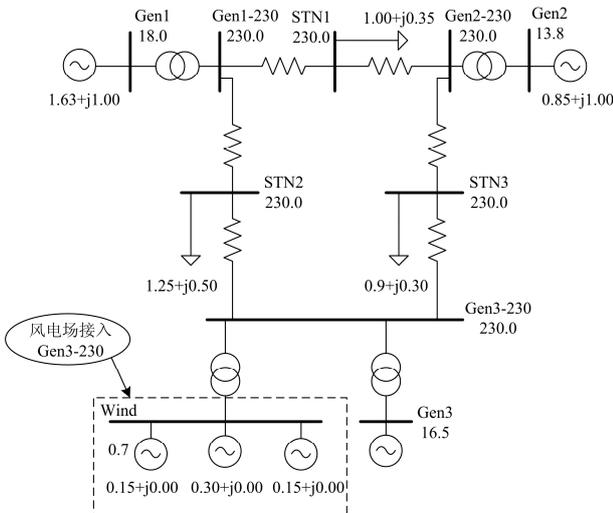


图 11 含三台等值风机的 WSCC-9 节点系统

Fig. 11 WSCC-9 bus system with three equivalent wind turbines

类比 2.3.1 节仿真情形, 保持风电场运行环境不变, 当母线 STN2 的负荷有功功率分别增加至 1.6 p.u.、2.0 p.u. 和 2.3 p.u. 时, 风电场输出和输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线如图 12 所示。

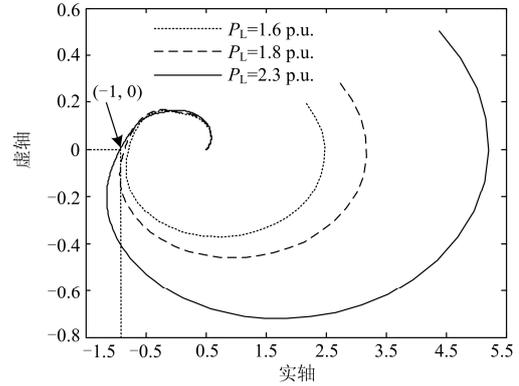


图 12 含三台等值风机的输出和输入阻抗比 T_m 的 Nyquist 曲线

Fig. 12 Nyquist curve of T_m with three equivalent wind turbines

由图 12 可知, 随着负荷功率的增加, 特别是当功率增加至 1.8 p.u. 时, Nyquist 曲线已经几乎接近 $(-1, 0)$ 点, 处于临界稳定, 随着负荷功率继续增加, Nyquist 曲线超过 $(-1, 0)$ 点的左边区域, 系统失去稳定。故将风电场等值为三台风机的模型以后, 虽然总趋势与一台风机类似, 但由于等效模型的相对精确性, 使得 Nyquist 曲线能更加灵敏地反映出系统的稳定状态。

4 结论

考虑变换器对分布式电源并网稳定性的影响, 推导了基于输出和输入阻抗比的 Nyquist 曲线稳定分析判据。在 PMSG 并网系统简化状态方程基础上, 得到了 PMSG 的输出阻抗, 提出了基于输出和输入阻抗比的 PMSG 并网稳定分析方法。通过简单系统和 WSCC-9 节点系统的仿真分析表明:

- 1) 所提基于输出和输入阻抗比的 PMSG 并网稳定分析方法能有效判断 PMSG 并网系统的稳定性;
- 2) 与传统 PV 曲线法相比, 所提方法能更准确地判断系统的失稳点和稳定极限;
- 3) PMSG 型风电场接入电网后, 随着负荷功率的增加, 系统的稳定性下降;
- 4) 风电场等值模型对于系统的稳定性判断有一定的影响, 考虑风电场实际风速不均衡等其他因素的影响, 将风电场等值为三台风速功率不同的风机后, 其结果比等效为一台风机更加精确。

下一步将在桨距角控制对 PMSG 并网稳定性的影响展开相关研究。

附录

额定功率为 1.5 MW 的 PMSG 参数如表 2 所示。

表 2 PMSG 的参数

Table 2 Parameters of a PMSG

参数	数值	符号/单位
额定功率	1.5	MW
额定风速	14	m/s
空气密度	1.225	$\rho/(kg\cdot m^{-3})$
风能利用系数	0.4832	C_p
叶尖速比	6.25	λ
定子电感	3.57×10^{-4}	L_d/H
极对数	28	n_p
转子磁链	8.748	ψ/Wb
转动惯量	5000	$J_{ed}/(kg\cdot m^2)$
直流母线电容	3.8×10^{-2}	C/F
直流电压	1200	V_{dc}/V
滤波电阻	3.5×10^{-3}	R_f/Ω
滤波电感	4.3×10^{-5}	L_f/H

参考文献

[1] 李先奇. 变速风电机组风电场并网系统电压稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
LI Xianqi. Research on the impact of variable speed wind turbines integration on power system voltage stability[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.

[2] 杨勇, 阮毅, 张朝艺, 等. 基于背靠背三电平电压变换器的直驱式风力发电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 148-155.
YANG Yong, RUAN Yi, ZHANG Chaoyi, et al. Direct-driven wind power generation system based on back-to-back three-level converter[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 148-155.

[3] HAO Z, YAO Z, LI S, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.

[4] 李立成, 叶林. 变风速下永磁直驱风电机组频率-转速协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 26-31.
LI Licheng, YE Lin. Coordinated control of frequency and rotational speed for direct permanent magnet synchronous generator wind turbine at variable wind speeds[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 26-31.

[5] 刘景利, 张友鹏, 高峰阳, 等. 永磁直驱风电变流器控制策略及仿真研究[J]. 电源技术, 2012, 36(4): 555-557.

LIU Jingli, ZHANG Youpeng, GAO Fengyang, et al. Control strategies and simulation research of direct-drive permanent-magnet wind power system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(4): 555-557.

[6] KATIRAE F, IRAVANI M R, LEHN P W. Small-signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources[J]. IET Gener Transm Distrib, 2007, 25(3): 369-378.

[7] IAO Z X, PIYASINGHE L, KHAZAEI J, et al. Dynamic phasor-based modeling of unbalanced radial distribution systems[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2015, 30(6): 3102-3109.

[8] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.
WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.

[9] SHEN Y W, KE D P, SUN Y Z, et al. Advanced auxiliary control of an energy storage device for transient voltage support of a doubly fed induction generator[J]. IEEE Transaction on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 63-76.

[10] SHEN Y W, KE D P, WEI Y, et al. Transient reconfiguration and coordinated control for power converters to enhance the LVRT of a DFIG wind turbine with an energy storage device[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1679-1686.

[11] 耿华, 许德伟, 吴斌, 等. 永磁直驱变速风电系统的控制及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 68-75.
GENG Hua, XU Dewei, WU Bin, et al. Control and stability analysis for the permanent magnetic synchronous generator based direct driven variable speed wind energy conversion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 68-75.

[12] 李东东, 梁自超, 周玉琦. 含风电场的受端系统暂态电压稳定性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 8-14.
LI Dongdong, LIANG Zichao, ZHOU Yuqi. Transient voltage stability assessment of receiving end grid incorporating with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 8-14.

[13] 向如意, 杨金明, 王林, 等. 基于小信号模型的永磁直驱风电系统特征值灵敏度分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 94-101.
XIANG Ruyi, YANG Jinming, WANG Lin, et al. Analysis on eigenvalue sensitivity of driven permanent magnet

- wind power system based on small signal model[J]. *Power System and Energy*, 2015, 31(5): 94-101.
- [14] 向如意, 杨金明, 王林, 等. 基于小信号模型的永磁直驱风电系统特征值灵敏度分析[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(5): 94-101.
XIANG Ruyi, YANG Jinming, WANG Lin, et al. Analysis on eigenvalue sensitivity of driven permanent magnet wind power system based on small signal model[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(5): 94-101.
- [15] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(11): 33-40.
JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct-drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(11): 33-40.
- [16] LIU F C, LIU J J, ZHANG H D, et al. Terminal admittance based stability criterion for multi-module DC distributed system[J]. *IEEE Electrical Insulation and Power Equipment*, 2014, 35(16): 580-586.
- [17] LIU Z, LIU J J, HOU X Y, et al. Output impedance modeling and stability prediction of three-phase paralleled inverters with master-slave sharing scheme based on terminal characteristics of individual inverters[J]. *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2016, 31(7): 5306-5320.
- [18] 杨晓雷, 金山红, 唐昕, 等. 省地县三级 AVC 系统协调控制及实现[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(2): 39-42, 47.
YANG Xiaolei, JIN Shanong, TANG Xin, et al. Province-prefecture-county AVC system coordination control and its realization[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(2): 39-42, 47.
- [19] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulator[C] // *IEEE Industrial Application Society Annual Meeting*. Chicago, USA: IEEE, 1976: 366-382.
- [20] 刘增, 刘仅军. 带变流器负载的三相交流电源系统稳定性判据的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 143-148.
LIU Zeng, LIU Jinjun. Stability criterion for three-phase AC power systems with converter load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(25): 143-148.
- [21] 吴麒, 王诗宓, 杜继宏, 等. *自动控制原理*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [22] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. *热力发电*, 2015, 44(11): 104-108.
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(11): 104-108.
- [23] 姚骏, 赵磊, 刘奥林, 等. 基于模糊比例-微分控制的永磁直驱风电机组频率调节[J]. *电网技术*, 2014, 38(11): 3095-3102.
YAO Jun, ZHAO Lei, LIU Aolin, et al. Fuzzy proportional plus-derivative control based frequency regulation of permanent magnet direct-drive wind power generation unit[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(11): 3095-3102.
- [24] 曹娜, 黄坤, 于群, 等. 基于动态励磁电流的双馈风机组控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(6): 29-34.
CAO Na, HUANG Kun, YU Qun, et al. A control strategy of doubly-fed induction generator based on dynamic process of excitation current[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(6): 29-34.
- [25] 牟晓明. *电力系统戴维南等值参数解析及电压薄弱性研究*[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
MOU Xiaoming. Investigation on the Thevenin equivalent parameters analysis and voltage weakness of power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

收稿日期: 2016-08-23; 修回日期: 2017-03-03

作者简介:

沈阳武(1985—), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为新能源发电系统的运行与控制; E-mail: shenyangwu@126.com

葛云霞(1990—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变换器并网运行与稳定分析和电力系统电压稳定; E-mail: 460726682@qq.com

崔挺(1986—), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(编辑 葛艳娜)