

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.01.012

# 基于 PSASP 自定义接口功能的直驱型风电机组简化模型

吴峰<sup>1</sup>, 睢康<sup>1</sup>, 黄弘扬<sup>2</sup>, 史林军<sup>1</sup>, 华文<sup>2</sup>, 赵一琰<sup>2</sup>, 邓晖<sup>2</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏南京 211100; 2. 浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江杭州 310000)

**摘要:** 针对大规模直驱永磁风电系统机电暂态仿真时采用 PSASP 自带的通用发电机模型不能表达实际直驱型永磁风力发电机组(简称 D-PMSG)运行特性的问题,以某地近海风电场 D-PMSG 单机测试数据作为参考,利用 PSASP 自定义建模环境(PSAP/UD)搭建直驱永磁风机暂态简化模型。D-PMSG 暂态简化模型忽略发电机及机侧变流器影响,同时考虑低电压穿越时动态短路电流的特性、电压频率保护控制以及有功恢复速率设置,将 D-PMSG 当成带有低压穿越保护的受控电流源,并根据 D-PMSG 低压穿越时的实测数据基于遗传算法实现了重要参数的优化工作。通过分别将 D-PMSG 暂态简化模型与详细模型、增加爬坡功率设置以及单机测试系统实测运行数据在三相短路故障条件下的对比,验证了 D-PMSG 暂态简化方法的正确性,以及参数优化方法的有效性。

**关键词:** 直驱型永磁风力发电机组; 低压穿越; 参数优化; PSASP/UD; 遗传算法; 近海风电场  
中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2019)01-0079-09

## Simplified modeling and parameter identification of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator based on PSASP

WU Feng<sup>1</sup>, JU Kang<sup>1</sup>, HUANG Hongyang<sup>2</sup>, SHI Linjun<sup>1</sup>, HUA Wen<sup>2</sup>, ZHAO Yiyan<sup>2</sup>, DENG Hui<sup>2</sup>

(1. Collage of Energy and Electricity, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Electric Power Corporation Electric Power Research Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** To solve the problem that the PSASP built-in generator model can't express the actual operating characteristics of direct-driven permanent magnet wind turbine (D-PMSG) in large-scale wind farm system, a simplified D-PMSG based on PSASP user custom model (PSASP/UD) has been built. The influences of generator and machine side converter are ignored by the transient simplified model of permanent magnet direct-drive fan. Considering the characteristics of the dynamic short circuit current during low voltage ride-through, the voltage frequency protection control and the active recovery rate setting, the transient simplified model is taken as a controlled current source with low-voltage protection characteristics and important parameters are optimized based on genetic algorithm. By comparing the D-PMSG transient simplified model with the detailed model, increasing the active recovery rate setting, and comparing the measured operating data of the single-machine test system under three-phase short-circuit fault condition, the correctness of transient simplified method for the permanent magnet direct-drive fan has been verified, and the parameter optimization method is also validated.

**Key words:** directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generators (D-PMSG); low voltage ride-through; parameter optimization; PSASP/UD; genetic algorithm (GA); offshore wind farm

能源与环境问题已成为制约中国经济发展的最大阻碍,大力发展和利用以风能为主的可再生能源已经

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年项目(51422701)

作者简介: 吴峰(1977—),男,教授,博士,主要从事可再生能源发电系统的建模与控制研究。E-mail: wufeng@hhu.edu.cn

引用本文: 吴峰, 睢康, 黄弘扬, 等. 基于 PSASP 自定义接口功能的直驱型风电机组简化模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 79-87.

WU Feng, JU Kang, HUANG Hongyang, et al. Simplified modeling and parameter identification of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator based on PSASP [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(1): 79-87.

上升到国家战略的重要程度。根据国家“十三五”发展规划,东南沿海将成为我国重要的海上风电基地。直驱型永磁风力发电机组(简称 D-PMSG)相比于双馈风机具有运行可靠性高、维护费用低、无功调节能力强等优点<sup>[1-2]</sup>。搭建考虑低压穿越过程的 D-PMSG 并网系统,研究含 D-PMSG 风电接入的电力系统稳定问题具有重要的现实意义<sup>[3]</sup>。

D-PMSG 详细模型虽然可以精确反映风电机组的运行特性,但是结构复杂、计算量大,不适合大规模风电场暂态稳定性研究,因此需要根据研究目标对暂态模型进行简化。文献[4-5]认为在暂态稳定分析的时间尺度内 D-PMSG 的机侧元件没有动态响应,网侧响应主要由机组的网侧变流器及其控制决定,因此可以不对机侧元件及其控制器详细建模,而是仅考虑它们的运行状态和控制效果,文献提出将 D-PMSG 等效成受控电压源或受控电流源,为 D-PMSG 的简化工作提供了有效的思路。文献[6-7]在文献[4-5]提出的简化模型基础上,根据风电机组低压穿越过程中的跌落及无功动态响应对机组进一步简化,通过模拟低压穿越时风电机组的动态特性验证了简化模型的有效性。文献[8]则是将 D-PMSG 的 2 种简化模型对比,论证了大规模风电集群并网时受控电流源型 D-PMSG 比受控电压源模型更能保证暂态稳定分析的正确性。这些研究成果为本文实现简化模型搭建提供了参考,本文针对 D-PMSG 简化建模存在的以下 2 个方面不足提出改进。

a. 已有文献在构造 D-PMSG 暂态简化模型时,没有考虑低压穿越过程中风机在功率恢复过程中发生功率突变的情况,同时已有文献没有考虑限流环节约束并根据并网标准设置短路电流和电压频率保护。这就导致当低压穿越过程(LVRT)发生在大规模风场时,该地区的电网电压会瞬间升高并对电网造成二次冲击,从而对系统稳定性造成不利的影响。为了解决上述问题,本文构建了低压穿越及控制保护模块,并限制了功率恢复速率从而避免产生功率突变。

b. 已有文献在构造 D-PMSG 暂态简化模型时往往忽略模型参数的优化过程,未能利用参数优化的方法使简化模型的仿真结果与实测数据更加接近,难以满足工程应用的需要。为此本文引入遗传算法对关键参数进行优化。

针对上述研究需求,本文重点关注适用于实际工程的 D-PMSG 建模方法,研究适用于 PSASP 仿真系统的 D-PMSG 简化模型。本文首先分析 D-PMSG 暂态稳定模型简化原理,详细研究使用 PSASP/UD 建模环境搭建 D-PMSG 简化模型的流程,考虑低压穿越条件下限流模式的选择以及短路电流的设置,设计有功恢复速率并根据遗传算法完成对重要参数的优化工作。以三机九节点系统为例,对比分析 D-PMSG 采用详细模型和简化模型时系统的暂态仿真结果与仿真速度,仿真验证模型的合理性。随后对比低压穿越恢复过程中恢复速率设置与否对系统的影响,表明设置短路电流和有功恢复速率的重要性。最后根据某地近海风电场低压穿越时的实测数据,与 PSASP 中参数优化好的 D-PMSG 暂态简化模型仿真结果进行对比,验证了模型的高精度及正确性。

## 1 D-PMSG 自定义暂态模型简化原理

D-PMSG 的机理详细建模包括风速模型、风力机模型、传动模型、永磁同步发电机和全功率变流器以及卸荷电路<sup>[9-10]</sup>。风力机通过轴系模型与永磁同步发电机相连,发电机再通过全功率变流器直接与电网相接。

D-PMSG 详细建模过程需要考虑 PMSG 全部的控制环节,包括桨距角控制、机侧变流器控制、网侧变流器控制以及卸荷电路投切控制<sup>[11]</sup>。这样的机理建模,需对风机各部分单独建模,再组合成完整风机的模型,工作量大,不适于大型风电场研究<sup>[12]</sup>。

D-PMSG 暂态简化过程根据其空间结构及运行特点可以主要分为 3 部分。第一部分为风机简化:由于暂态时间尺度小于风速波动时间间隔,可以认为风速恒定<sup>[8]</sup>。因此,可以在考虑最大功率追踪控制的基础上使用风速到功率的转换模型计算风机潮流输出功率。

第二部分为发电机及机侧变流器简化:D-PMSG 变流器的控制方式采用功率外环与电流内环的控制方式,D-PMSG 根据变流器控制方面简化程度的大小分为 2 种:一种是受控电压源型 D-PMSG 简化模型,一种是受控电流源型简化模型。受控电压源型 D-PMSG 简化模型对机侧变流器和永磁同步发电机进行简化,用电压源型逆变器模拟 D-PMSG。考虑到电流内环控制网侧输出电流的上升时间仅为 3 ms 左右,远小于若干个周波的网侧扰动作用时间,受控电流源型 D-PMSG 简化模型实际上是在受控电压源模型的基础上省去电流内环的控制过程,直接由功率控制外环给定 PMSG 的网侧输出电流。同时考虑到文献[8]得出的大规模

风电集群并网时受控电流源型 PMSG 比受控电压源模型更能保证暂态稳定分析正确性的结论,本文采用受控电流源型 D-PMSG 的控制方式。

第三部分为基于低压穿越故障特性对 D-PMSG 带有限流条件约束的简化。在我国风电并网标准<sup>[13]</sup>下,风力发电机组必须具有一定的低压穿越能力,需要在故障时根据电压跌落程度调整输出电流来为系统提供无功支撑。这就使得不能简单地将 D-PMSG 等效成恒定的电流源,需要考虑限流约束和低压穿越条件下短路电流的设置问题。由于低压穿越过程中输出的短路电流由机端电压及故障前的工况共同决定,同时为了恢复过程有功突变的出现对系统暂态稳定性造成影响而需要设置有功爬坡恢复。因此,D-PMSG 等效电路需要表示为一个带有低压保护的受控电流源。

PSASP 软件中没有自带直驱永磁风机模型,其基本发电机模型不能准确表述实际工程中 D-PMSG 的运行特性。为此笔者根据上述 D-PMSG 简化的原理,考虑 PSASP 并网接口特点搭建基于 PSASP/UD 建模环境的 D-PMSG 暂态简化模型。详细的建模步骤如下:

- a. 根据稳态风速到功率的转换模型获取风机有功和无功,完成 PSASP/UD 初始化并设置初始电流。
- b. 根据网侧逆变器控制模块完成有功、无功解耦控制,并设置有功、无功限流模式。
- c. 获取  $dq$  坐标系下的电流分量,经过故障穿越及控制保护模块,完成低压穿越故障情况下短路电流的设置及故障恢复过程的爬坡功率设置,再根据故障时间设置频率和电压二级保护控制。
- d. 根据输出电流计算模块完成 PSASP/UD 到电网系统的交互工作,将  $dq$  坐标系下的电流转换到  $xy$  坐标系下,再计算电网经过 D-PMSG 简化模型后的功率,作为网侧逆变器控制模块反馈量。
- e. 在 Matlab/Simulink 中按照上述原理搭建模型,并通过遗传算法(GA)完成参数优化工作。

## 2 D-PMSG 自定义暂态简化模型的实现

本节主要在第 1 节的基础上具体阐述使用 PSASP/UD 构建 D-PMSG 自定义暂态简化模型的实现方法。D-PMSG 暂态稳定自定义简化模型主要由功率转换模块、网侧逆变器运行控制模块、故障穿越及保护控制模块、输出电流计算模块、基于遗传算法参数优化模块共 5 个模块组成(图 1,其中  $V$  为输入风速, $P$ 、 $Q$  为电网视在功率, $P_{ord}$  和  $Q_{ord}$  分别为功率转换模块输出的有功和无功参考值,  $I_{p cmd}$  和  $I_{q cmd}$  分别为网侧逆变器控制模块输出的  $dq$  坐标系下的有功电流和无功电流)。

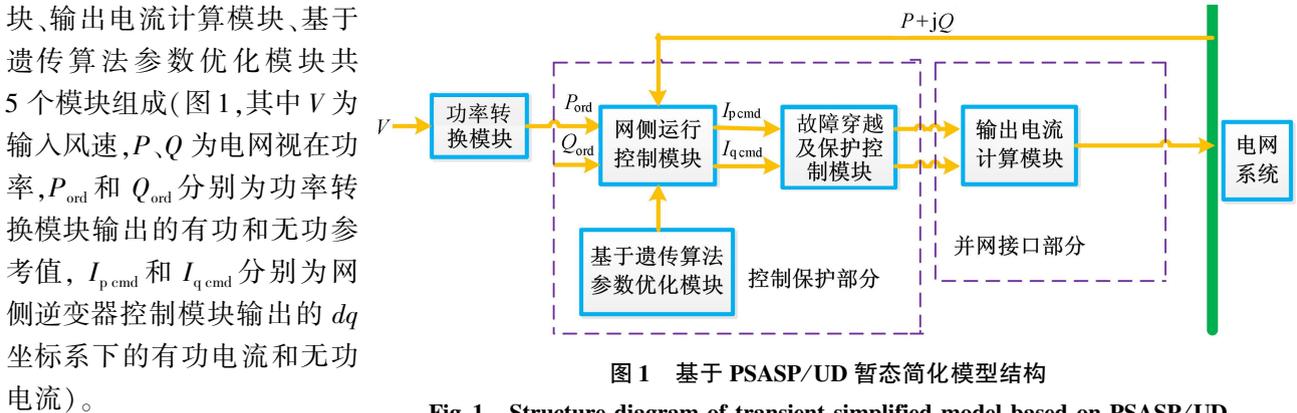


图 1 基于 PSASP/UD 暂态简化模型结构

Fig. 1 Structure diagram of transient simplified model based on PSASP/UD

### 2.1 D-PMSG 功率转换模块

在暂态时间尺度内,由于暂态时间间隔小于风速波动时间间隔,可以认为风速恒定。因此,可以在考虑最大功率追踪控制的基础上,使用风速到功率的转换模型计算风机机械输出功率。考虑到风电机组运行于 4 个不同的运行区域:起动区、最大功率跟踪区、恒转速区与恒功率区,同时考虑到风机 MPPT 最优控制理论<sup>[15]</sup>,风机的机械输出功率与风速的关系如下:

$$P = \begin{cases} 0 & v \leq v_{start-up} \\ K_{mppt} \left( \frac{\lambda_{opt} v}{R} \right)^3 = 0.5 C_{p,max} \rho \pi R^2 v^3 & v_{start-up} < v \leq v_s \\ 0.5 C_p \left( \frac{\omega^* v}{R}, 0 \right) \rho \pi R^2 v^3 & v_s < v \leq v_{ref} \\ P^* & v_{ref} < v \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left( \frac{116}{\beta} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\beta}} \\ \beta = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $C_{p_{\max}}$ ——最大风能转换系数;  $\lambda$ ——尖速比,  $\lambda = \omega_w R/v$ ;  $C_p(\lambda, \theta)$ ——叶尖速比与桨距角对应的风能转换系数;  $C_p(\omega^* v/R, 0)$ ——叶尖速比为  $\omega^* v/R$ 、桨距角为 0 时所对应的风能转换系数;  $\omega$ ——风力机转速;  $\omega^*$ ——额定转速, 为 1.7143 rad/s;  $R$ ——风力机叶片半径, 为 42 m;  $\rho$ ——空气密度, 一般取 1.225 kg/m<sup>3</sup>;  $\theta$ ——桨距角;  $P^*$ ——额定功率, 为 2 MW;  $v_{\text{ref}}$ ——额定风速, 为 11 m/s;  $v_{\text{start-up}}$ 、 $v_s$ ——风机启动风速与和当风机启动后风机转速第一次达到额定转速时对应的风速, 分别为 4 m/s 和 9.14 m/s;  $\beta$ ——中间变量。

D-PMSG 潮流系统与暂态模型在 PSASP 中的交互主要体现在功率转换模块上, 潮流为暂态稳定计算提供初始化稳态运行点<sup>[16]</sup>。D-PMSG 在潮流过程中根据式(1)(2)将风速转换成风机机械功率并输出到稳态系统中, 在暂态模型的功率转换模块中获取系统稳态 D-PMSG 的输出功率。

## 2.2 网侧逆变器运行控制模块

网侧逆变器运行控制模块是在考虑限流模式选择的条件下使用受控电流源模型来简化变流器。根据简化原理, 在暂态稳定分析的时间尺度内, 永磁同步发电机组与电网之间被全功率变流器相隔, 网侧的扰动对机侧元件几乎没有影响, D-PMSG 的网侧响应主要由机组的网侧变流器及其控制决定。本模块在文献[8]的基础上使用受控电流源模型来简化变流器并添加详细限流环节。受控电流源型 D-PMSG 简化模型采用的控制策略是有功、无功解耦控制, 主要是根据有功、无功解耦得到的电流当作电流源作为网侧变流器的输出。有功、无功解耦控制是基于电压  $d$  轴定向, 此时有功、无功的值由网侧输出电流和电网电压决定, 有功、无功解耦控制方程如下:

$$P_s = \frac{3}{2} U_{ds} I_{ds} \quad Q_s = -\frac{3}{2} U_{ds} I_{qs} \quad (3)$$

由此可以看出, 在  $d$  轴电压  $U_{ds}$  不变的情况下, 通过调节  $d$  轴电流分量  $I_{ds}$  可以直接控制网侧输出的有功  $P_s$ , 通过调节  $q$  轴电流分量  $I_{qs}$  可以直接调节网侧输出的无功  $Q_s$ , 从而实现解耦控制。有功、无功解耦控制方程确定了网侧变流器的有功、无功与电流之间存在线性关系, 为了能够跟踪 2.1 节功率转换模块输出的风机机械功率和风机无功参考值, 有功、无功控制模块采用 PI 控制器来模拟跟踪过程。PI 控制器共有 4 个参数  $K_p$ 、 $K_{pi}$ 、 $K_q$ 、 $K_{qi}$ , 它们分别作为有功 PI 控制器和无功 PI 控制器的比例值与积分值。有功、无功控制如图 2 所示 ( $I_{p_{\max}}$ 、 $I_{p_{\min}}$ 、 $I_{q_{\max}}$ 、 $I_{q_{\min}}$  为限流值)。

本文在受控电流源模型的基础上增设限流环节。限流环节设置是必要的, 文献[17]表明取消限流环节作用后的风电场出口短路电流将显著增大, 短路电流最大值可以达到 3 倍左右, 这会造成变频器功率器件损坏。限流环节根据有功优先还是无功优先分为 2 种模式。当系统正常运行时采用有功优先模式(式(4)); 当低电压穿越时, 系统无功的波动对系统影响更大, 采用无功优先模式(式(5))。

$$I_{q_{\max}} = I_{\max} \quad I_{q_{\min}} = -I_{\max} \quad I_{p_{\max}} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{q_{\text{cmd}}}^2} \quad I_{p_{\min}} = 0 \quad (4)$$

$$I_{p_{\max}} = I_{\max} \quad I_{p_{\min}} = 0 \quad I_{q_{\max}} = \sqrt{I_{\max}^2 - I_{p_{\text{cmd}}}^2} \quad I_{q_{\min}} = -\sqrt{I_{\max}^2 - I_{p_{\text{cmd}}}^2} \quad (5)$$

式中:  $I_{\max}$ ——最大电流限值。

## 2.3 故障穿越及保护控制模块

针对已有文献构造 D-PMSG 暂态简化模型时未考虑低压穿越过程中功率恢复时发生功率突变以及没有考虑限流环约束, 并根据并网标准设置短路电流和电压频率保护的情况, 本文构建故障穿越及保护控制模块。模块共 3 个部分: 动态短路电流设计、电压频率保护控制、有功恢复速率控制。

动态短路电流设计的目标是当运行点发生故障引起电压过低时, 可以给系统提供一定的有功和无功支

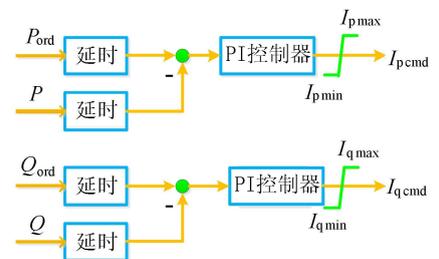


图2 有功无功控制示意图

Fig.2 Schematic diagram of active and reactive power control

撑<sup>[18]</sup>。在 PSASP/UD 中表示为给有功电流和无功电流一定的短路电流值,防止系统震荡失稳。根据文献 [19] 对于 D-PMSG 动态短路电流的描述,动态短路电流值由电压跌落的大小及故障前工况共同决定。故障前电流工况可通过  $d$  轴电压定向原理根据故障前有功、无功及电压值计算获取:

$$I_{p-FRT} = \frac{2P_{FRT0}}{3U_{FRT0}} \quad I_{q0-LV} = -\frac{2Q_{FRT0}}{3U_{FRT0}} \quad (6)$$

式中:  $I_{p-FRT}$ 、 $I_{q0-LV}$ ——故障前  $dq$  坐标系下的电流实部和虚部;  $P_{FRT0}$ 、 $Q_{FRT0}$ 、 $U_{FRT0}$ ——故障前有功、无功及电压。

由 2.2 节中的限流环节可知,在低压穿越期间限流模式一直采用无功优先模式。根据风电并网标准<sup>[13]</sup>对低压穿越时无功电流的要求:当电网电压低于 0.9 标幺值时,动态无功电流幅值增加量不小于电压跌落量的 1.5 倍。D-PMSG 在低压穿越期间的动态短路电流可由式(7)(8)得出:

$$I_p = \begin{cases} I_{p-cmd} & 0.9 < U < U_{HVI} \\ I_{p-FRT} & U \leq 0.9 \end{cases} \quad (7)$$

$$I_q = \begin{cases} I_{q-cmd} & 0.9 < U < U_{HVI} \\ \min(k(0.9 - U) + I_{q0-LV}, I_{q-max-LV}) & 0.9 \geq U, k \geq 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $U$ 、 $U_{HVI}$ ——母线电压和电压上限阈值;  $I_{q-max-LV}$ ——低压穿越时最大无功电流设置。

电压频率保护控制设计是为了满足 D-PMSG 暂态简化模型的并网要求,并为后续暂态稳定性的研究提供模型支撑。面对低压穿越时可能遇上的过/欠电压、过/欠频情况,本文采用二级保护的控制策略。参考风电场并网标准<sup>[13]</sup>对电压和频率的要求,在 PSASP/UD 中需要设置保护信号,信号初始值为 0;当电压或频率未达到并网要求时,信号值为 1,保护装置动作,进行相应的保护策略。

爬坡功率设置是为了解决低压穿越的故障恢复阶段产生的突变有功问题。在大规模 D-PMSG 接入电网时,故障恢复过程中突变有功将会对电网造成二次冲击并影响系统的稳定性。爬坡功率设置使得有功随着坡道缓缓上升,减小对电网的冲击。爬坡功率设置是通过逻辑元件检测故障发生时间以及故障持续时间后,对有功电流进行微分、设置上下限、再积分的过程。积分初值设置为故障前有功电流值,具体参考式(6)。

故障穿越及保护控制模块的整体结构如图 3 所示。

## 2.4 输出电流计算模块

输出电流计算模块主要完成 PSASP/UD 模型到 PSASP 系统的交互工作。模块主要由两部分内容组成:初始化过程将功率转换成电流,接口建模过程将电流顺时针旋转电压相角。PSASP 以暂态过程中的母线正序电压和电流实部和虚部作为标准输入、输出量提供给用户自定义模型使用,因此在建立 PSASP/UD 到 PSASP 系统联系时,需要将功率量转换为电流量<sup>[17]</sup>,功率转换公式如下:

$$I_{TRO} = \frac{V_{T0}Q_{G0}\sin\theta_1 + V_{T0}P_{G0}\cos\theta_1}{V_{T0}^2}$$

$$I_{TIO} = \frac{V_{T0}P_{G0}\sin\theta_1 - V_{T0}Q_{G0}\cos\theta_1}{V_{T0}^2} \quad (9)$$

式中:  $P_{G0}$ 、 $Q_{G0}$ ——从潮流系统中读取的初始有功和初始无功;  $V_{T0}$ ——母线端电压初值;  $\theta_1$ ——电压相角;  $I_{TRO}$ 、 $I_{TIO}$ ——实部和虚部电流初值。

输出电流计算模块从 2.3 节故障穿越及保护控制模块获取的电流实部和虚部是经过  $dq$  坐标解耦控制获得的,其坐标系以电压  $d$  轴为  $x$  轴。而输出到 PSASP 系统母线的电流所在的坐标系以电流实部为  $x$  轴,因此需要将坐标系顺时针旋转电压相角的大小。电流转换公式如下:

$$I_{TRP} = \cos\left[\arctan\left(\frac{I_{TR}}{I_{TI}}\right) + \theta_1\right] \sqrt{I_{TR}^2 + I_{TI}^2} \quad I_{TIP} = \sin\left[\arctan\left(\frac{I_{TR}}{I_{TI}}\right) + \theta_1\right] \sqrt{I_{TR}^2 + I_{TI}^2} \quad (10)$$

式中:  $I_{TRP}$ 、 $I_{TIP}$ ——电流坐标系下的电流实部和虚部;  $I_{TR}$ 、 $I_{TI}$ ——故障穿越及保护控制模块获取电流实部和虚部。

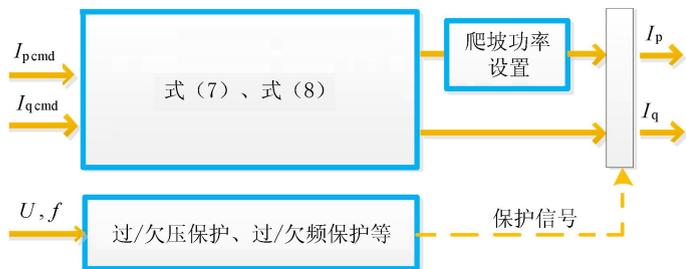


图 3 故障穿越及保护控制模块结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of low-voltage ride-through and protection control module

## 2.5 基于遗传算法参数优化模块

已有文献在构造 D-PMSG 暂态简化模型时往往忽略模型参数的优化过程,未能利用参数优化的方法使简化模型的仿真结果与实测数据更加接近,难以满足工程应用的需要。为此本文引入遗传算法对关键参数进行优化。遗传算法(GA)通过多维种群的交叉、变异、选择的迭代方式,具有全局搜索能力较强的优点<sup>[20]</sup>。为达到优化 D-PMSG 暂态简化模型重要参数的目的,在 Matlab/Simulink 中搭建与 PSASP/UD 中逻辑相同的暂态简化模型,根据需要拟合的目标数据应用 GA 进行参数优化,其中目标数据分别是 D-PMSG 详细模型的有功、无功输出结果和某地近海风电场 D-PMSG 单机无穷大并网试验数据。永磁直驱风机简化模型中采用遗传算法主要用于优化 2.2 节网侧变流器运行控制模块中 PI 控制器的 4 个比例积分参数  $K_p$ 、 $K_{pi}$ 、 $K_q$ 、 $K_{qi}$ 。具体步骤是:(a)参照 2.1~2.4 节 D-PMSG 暂态简化方法在 Matlab/Simulink 中搭建 D-PMSG 暂态简化模型。(b)设定 GA 的运行参数,初始化种群。(c)读取需要拟合的目标数据并设置目标函数,目标函数为低压穿越时 D-PMSG 暂态简化模型有功、无功与目标有功、无功数据的差值。根据输出误差计算个体适应度。(d)对种群进行轮盘赌、交叉、变异、精英保留策略,生成下一代群落。(e)判断终止条件是否满足,满足的话结束,不满足的跳转到步骤(c)。

## 3 仿真算例分析

### 3.1 与详细模型比较

分别搭建 D-PMSG 暂态简化模型与 D-PMSG 详细模型,并将它们进行对比,目的有 3 个:(a)通过简化模型与详细模型在三相短路故障条件下的对比,验证本文提出的 D-PMSG 暂态简化方法是合理正确的。(b)验证 2.5 节提出的使用遗传算法对参数进行优化能够很好地模拟出低压穿越故障条件下 D-PMSG 的动态特性。(c)为 2.2 节验证有功恢复速率爬坡功率设置的正确性提供模型基础。

Matlab/Simulink 中有自带的 D-PMSG 详细模型。为了验证本文提出的 D-PMSG 简化模型的正确性,观察低压穿越过程中暂态简化模型暂态特性的合理性,使用 Matlab R2016b 中 power-wind-type-4-det. slx 算例里面的 D-PMSG 详细模型在 Matlab/Simulink 中搭建三机九节点系统。三机九节点仿真系统结构如图 4 所示。风机运行参数如 2.1 节中所示。假设风电场在额定风速 11 m/s 的风机出口处发生三相对称短路故障,故障发生在 2 s 时电压跌落到 0 V,故障持续时间为 0.1 s。电压故障条件并没有达到需要脱网的要求,启动文中 2.3 节故障穿越及保护控制模块所提出的低压穿越保护策略。简化模型在 2.5 节参数优化过程中用作拟合的目标数据为详细模型有功、无功输出,参数优化的结果为: $K_p=0.312$ , $K_{pi}=0.124$ , $K_q=0.3$ , $K_{qi}=-0.12$ 。

详细模型与简化模型有功对比:如图 5 所示,详细模型的有功功率在 2 s 时发生功率跌落,随后有功突变到正常状态的 0.246 pu 左右,经过约 0.4 s 暂态过程后功率逐渐恢复到初始状态。简化模型仿真结果在故障恢复过程有功突变到 0.253 pu 左右,曲线与详细模型基本吻合。

详细模型与简化模型无功对比:如图 5(b)所示,详细模型的无功功率在故障恢复时突变到 0.3 pu 左右,大约 0.4 s 后恢复到初值。而简化模型总体趋势与详细模型一样,约 0.2 s 后恢复到稳定值。

分析总结:经过遗传算法将参数优化以后,暂态简化模型能够较好地模拟详细模型低压穿越的过程。故障恢复瞬间产生一定的过有功,这对电网是不利的。本文提出的 D-PMSG 暂态简化模型方法仿真过程能够更快地恢复到故障前的运行状态,因此本文提出的 D-PMSG 暂态简化方法合理有效。暂态简化模型仿真结果与详细模型吻合,证明了遗传算法参数优化的正确性。

### 3.2 与增加爬坡功率设置比较

在 3.1 节暂态简化模型的基础上,进一步通过算例论证 2.4 节提出的有功恢复速率设置的正确性。在

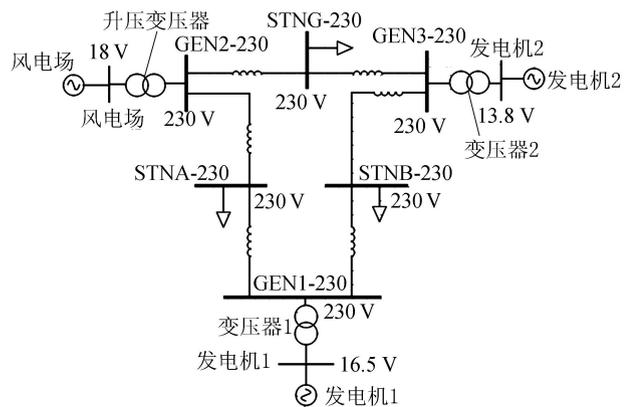


图4 三机九节点系统结构

Fig. 4 Schematic diagram of three machine nine node system

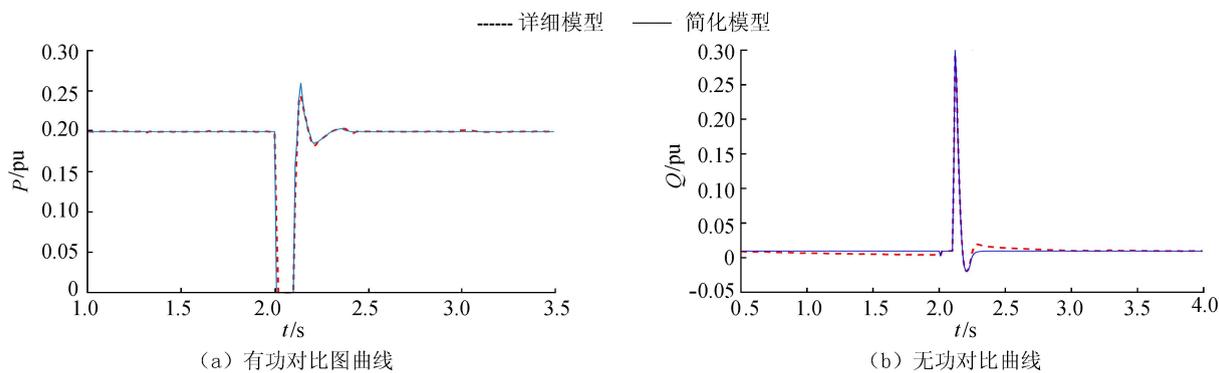


图 5 详细模型与简化模型有功及无功对比曲线

Fig. 5 Active and reactive power comparing diagram of detailed model and simplified model

实际工程中,当大功率系统故障恢复过程出现突变有功问题,将会对电网造成二次冲击。为了满足实际工程的需要,设计了爬坡功率设置(爬坡功率设置的详细过程在 2.4 节中有描述)。由于有功恢复速率设置时故障恢复的时间应该尽可能地与未设置时一致,爬坡功率设置的大小由故障恢复时间决定。本文将增加爬坡功率设置与 3.1 节图 5(a) 进行对比,仿真结果如图 6 所示。

从图 6 中可以明显看出在不包含有功恢复速率设置时,系统在故障恢复过程中出现了有功突变的情况,有功达到了 0.25 pu 左右,对系统稳定性和恢复速度都产生了一定影响。而爬坡功率设置则可以完全避免此问题,如图 6 蓝色实线所示恢复过程相当平滑,符合实际工程的需要。

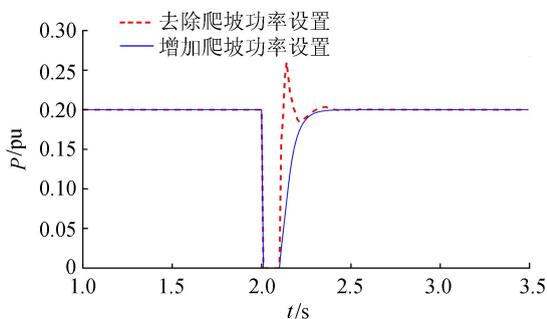


图 6 增加爬坡功率设置的简化模型仿真对比  
Fig. 6 Comparison of simplified models with and without setting increasing recovery rate

### 3.3 与实测数据比较

设计 D-PMSG 暂态简化模型的最终目的是为了利用 PSASP 模拟某地近海风电场 D-PMSG 单机无穷大测试系统的三相短路故障下的试验结果,为后续大规模风电接入做准备工作。本文在 PSASP 中搭建单机无穷大系统仿真,其网络结构如图 7 所示。D-PMSG 的暂态简化模型接入到风电场母线处,再通过升压变压器并网到 230 V 无穷大电网。在 2 s 时风电场母线发生三相短路故障,故障持续 0.1 s,风电场母线电压跌落到 0 V。为了保证暂态简化模型的仿真结果与单机无穷大测试结果相匹配,采用遗传算法对重要参数进行优化,具体的优化过程在 2.5 节中描述,参数优化结果为  $K_p=0.3, K_{pi}=0.25, K_q=0.9102, K_{qi}=-0.09$ 。

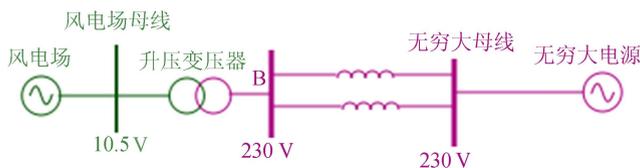


图 7 单机无穷大系统结构

Fig. 7 Schematic diagram of single-machine infinite-bus system

图 8(a)(b) 分别表示实测数据与 PSASP 简化模型仿真结果有功和无功对比。在故障恢复过程中,实测数据与简化模型的有功仿真波形都随着坡道缓缓恢复,无功都突变到了 0.35 pu 左右后迅速恢复。从图 8 中可以看出红色线和蓝色线基本重合在一起,只有很小的差别,说明参数优化效果很好。

总结:D-PMSG 简化模型采用遗传算法优化的参数很好地模拟了某地近海风电场 D-PMSG 单机无穷大测试数据,验证了简化模型的精确性。简化模型与实测数据结果接近,证明了可以通过 PSASP/UD 构建 D-PMSG 暂态简化模型能够简单、合理、精确地实现对实际工程的模拟。

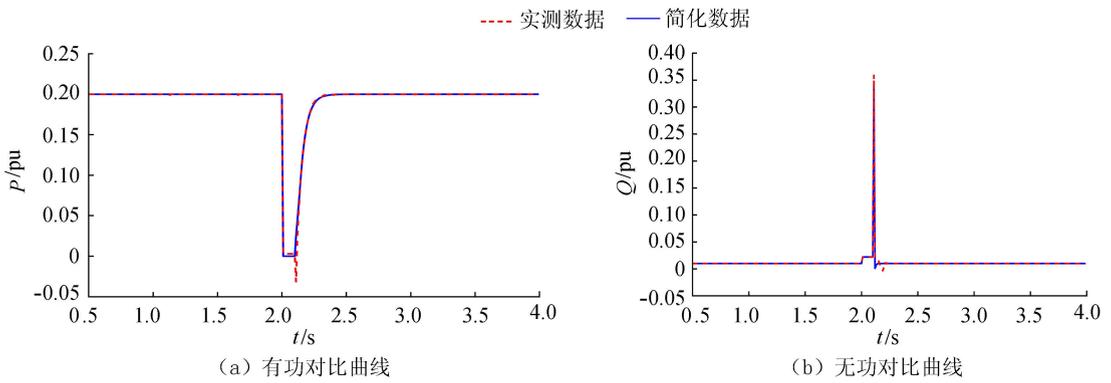


图8 实测数据与简化模型有功及无功对比曲线

Fig. 8 Active and reactive power comparing diagram of measured data and simplified model

## 4 结 语

大规模风电接入电网后要精确地描述风电场的每一个动态细节是比较复杂的,如何既简单又准确地反映风电场对大电网的建模是非常关键的。本文从故障情况下有功无功变化的角度对 D-PMSG 简化模型低压穿越特性进行分析,提出一种更为全面的 D-PMSG 直驱永磁风机简化策略,实现了利用 PSASP 用户自定义功能建立直驱型永磁同步风电机组 D-PMSG 简化模型的方法。本文详细阐述了 D-PMSG 暂态简化建模的原理,在 PSASP/UD 中将整个建模过程分成 5 个模块并一一详细阐述。最后在仿真算例中分别将 D-PMSG 暂态简化模型与详细模型、增加爬坡功率设置、单机测试系统实测运行数据在三相短路故障条件下进行对比,验证了 D-PMSG 简化方法的正确性与精确性。

### 参考文献:

- [ 1 ] LI S, HASKEW T A, SWATLOSKI R P, et al. Optimal and direct-current, vector control of direct-driven PMSG wind turbines [J]. Power Electronics, IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2325-2337.
- [ 2 ] WEN Bo, DONG Dong, BOROYEVICH D, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1): 26-38.
- [ 3 ] 李和明,董淑惠,王毅,等. 永磁直驱风电机组低电压穿越时的有功和无功协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 73-81. (LI Heming, DONG Shuhui, WANG Yi, et al. Coordinated control of active and reactive power of PMSG-Based wind turbines for low voltage ride-through[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 73-81. (in Chinese))
- [ 4 ] CONROY J, WATSON R. Aggregate modelling of wind farms containing full-converter wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines: transient stability studies[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 39-52.
- [ 5 ] 尹明,李庚银,张建成,等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65. (YIN Ming, LI Gengyin, ZHANG Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65. (in Chinese))
- [ 6 ] 徐力,王刚,侍乔明,等. 直驱永磁风电机组电压暂态简化建模及仿真[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 47-51. (XU Li, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A simplified modeling of transient voltage and simulation of direct drive permanent magnet synchronous generator[J]. Application of Motor and Control, 2015, 42(9): 47-51. (in Chinese))
- [ 7 ] 王慧,潘学萍,鞠平,等. 基于 PSO 算法的定速风电机组三质块传动系统模型参数辨识[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 84-88. (WANG Hui, PAN Xueping, JU Ping, et al. Parameter identification of three-mass drive-train system for fixed-speed wind turbine generator based on PSO algorithm[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(1): 84-88. (in Chinese))
- [ 8 ] 刘忠义,刘崇茹,李庚银. 适用于暂态稳定分析的直驱永磁风机建模研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 96-102. (LIU Zhongyi, LIU Chongru, LI Gengyin, et al. Modeling study of PMSG for transient stability analysis[J]. Power Grid and Clean Energy, 2016, 32(2): 96-102. (in Chinese))
- [ 9 ] 朱亮,徐希望,王祥旭. 基于 Matlab/Simulink 的永磁直驱风力发电机组建模和仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(9): 93-99. (ZHU Liang, XU Xiwang, WANG Xiangxu, et al. Modeling and simulation of permanent magnet direct-driven wind power generation system based on Matlab/Simulink[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(9): 93-99. (in Chinese))

- [10] 张涛,胡立锦,张新燕,等. 风力发电机通用化建模研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,40(13):1-6. (ZHANG Tao, HU Lijin, ZHANG Xinyan, et al. Research on universal modeling of wind turbines[J]. Power System Protection & Control, 2013, 40(13):1-6. (in Chinese))
- [11] 夏玥,李征,蔡旭,等. 基于直驱式永磁同步发电机组的风电场动态建模[J]. 电网技术,2014,38(6):1439-1445. (XIA Yue, LI Zheng, CAI Xu, et al. Dynamic modeling of wind farm composed of direct-driven permanent magnet synchronous generators[J]. Power System Technology, 2014,38(6):1439-1445. (in Chinese))
- [12] 魏书荣,樊潇,黄苏融,等. 海上风电场环形结构集电系统可用率等值计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):89-94. (WEI Shurong, FAN Xiao, HUANG Surong, et al. Method for calculating equivalent availability of ring collector system for an offshore wind farm [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44(1):89-94. (in Chinese))
- [13] 全国电力监管标准化技术委员会. 风电风电场接入电力系统技术规定:GBT 19963—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [14] 朱自强,丁明,张晶晶. 基于 PSASP 保护自定义建模的电网连锁故障仿真[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2016,39(5):617-621. (ZHU Ziqiang, DING Ming, ZHANG Jingjing. Simulation of power grid cascading failures protection and custom modeling based on PSASP [J]. Journal of HeFei University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 39(5):617-621. (in Chinese))
- [15] 王天钰,魏星,徐家俊,等. 考虑输入饱和的直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):129-132. (WANG Tianyu, WEI Xing, XU Jiajun, et al. MPPT control considering input saturation for D-PMSG system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(5):129-132. (in Chinese))
- [16] 李妍,荆盼盼,王丽,等. 通用储能系统数学模型及其 PSASP 建模研究[J]. 电网技术,2012,36(1):51-57. (LI Yan, JING Panpan, WANG Li, et al. General storage system mathematical model based on PSASP [J]. Power System Technology, 2012, 36(1):51-57. (in Chinese))
- [17] 许德操,韩民晓,丁辉,等. 基于 PSASP 的直流系统用户自定义建模[J]. 电力系统自动化,2007,31(6):71-76. (XU Decao, HAN Minxiao, DING Hui, et al. Modeling of HVDC Based on the user-defined model of PSASP[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6):71-76. (in Chinese))
- [18] 鞠平,苏玮奕,秦川. 基于电池储能和可控负荷的孤岛型海岛微电网频率协调控制策略[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(3):268-274. (JU Ping, SU Weiyi, QIN Chuan, et al. Coordinated control strategy for the islanded microgrid with battery and controllable load [J]. Journal of HoHai University of Technology (Natural Sciences), 2018, 46(3):268-274. (in Chinese))
- [19] 陈浩,胡晓波,严干贵,等. 直驱永磁风力发电机组低电压穿越的协调控制策略[J]. 电网技术,2013,37(5):1464-1470. (CHEN Hao, HU Xiaobo, YAN Gangui, et al. A coordinated control strategy for low voltage ride-through of direct-drive permanent magnet wind power generating units[J]. Power System Technology, 2013, 37(5):1464-1470. (in Chinese))
- [20] 吴峰,李玮. 含高渗透率分布式光伏发电系统的配电网动态等值分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(9):65-70,181. (WU Feng, LI Wei. Dynamic equivalence analysis of distribution network integrated with high penetration of distributed photovoltaic generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):65-70,181. (in Chinese))

(收稿日期:2018-07-25 编辑:高建群)