

# 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制

管维亚, 吴峰, 鞠平

(河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 分析了直驱永磁风力发电系统的基本原理及各模块的控制策略, 在 Matlab/Simulink 中搭建风电系统及其控制器的仿真模型, 仿真实验验证了模型的正确性。在发电机精确模型的基础上, 忽略发电机定子暂态得到实用模型, 并对两种模型的适用性进行讨论。仿真分析表明: 当分析发电机本身的动态问题时, 可采用精确模型; 当进行并网计算时, 实用模型和精确模型均可以准确描述。最后利用粒子群算法对直驱永磁风力发电系统中的控制器参数进行优化, 提高了系统的动态特性, 实验结果验证了该直驱永磁风力发电系统控制器参数优化方法的有效性和可行性。

**关键词:** 风力发电; 永磁同步发电机; 控制器; 模型比较; 参数优化

## Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system

GUAN Wei-ya, WU Feng, JU Ping

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** This paper analyzes basic principle and control strategy of direct-drive permanent magnet wind power generation (PMSG) system and builds the simulation model in Matlab/Simulink. The model is proved to be correct by simulation results. This paper also compares accurate generator model and the utility generator model which stator transient is neglected and discusses the applicability of the two models. Simulation results show that the accurate generator model is available to analyze dynamic problem of generator; both accurate generator model and utility generator model can accurately describe grid-connected problems. Finally, the parameters of controllers of direct-drive (PMSG) system is optimally designed by using particle swarm optimization, which improves the system dynamic characteristics. Simulation results indicate the feasibility and the effectiveness of this optimization method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51190102 and No. 51137002).

**Key words:** wind power generation; permanent magnet synchronous generator (PMSG); controller; model comparison; parameter optimization

中图分类号: TM313 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)09-0054-07

## 0 引言

直驱永磁风力发电系统较其他风力发电系统而言, 其转速可在大范围内变化, 其风能转换为电能的效率较高<sup>[1]</sup>。该系统直接由风机驱动, 省去齿轮箱等中间环节, 减少了维护费用和发电系统的噪音, 同时降低了部分机械损耗<sup>[2-3]</sup>。发电机转子由永磁材料构成, 无需励磁控制, 控制相对简单<sup>[4]</sup>。因此, 基于直驱永磁风力发电机的风力发电系统具有转速可调, 效率较高, 控制灵活等特点<sup>[5-7]</sup>。

在建模与仿真领域, 模型的阶次对分析问题的难易有着重要影响。在搭建风力发电系统仿真模型

时, 选取不同阶次的发电机模型可以对应解决不同类型的问题<sup>[8-9]</sup>。文献[10]研究了适用于小干扰稳定分析的双馈感应电机降阶模型; 文献[11]建立了直驱永磁发电系统的动态数学模型; 但对直驱永磁发电系统中不同发电机模型的适用性还需深入研究。

在对直驱永磁风力发电系统进行仿真的过程中, 合适的控制器参数能够有效地改善系统动态特性。然而目前国内外较多文献侧重于对风力发电系统的模块模型做定性分析, 仅有少量文献提到了风力发电系统控制器参数的优化选取, 如文献[12]研究了利用基因算法和响应面法对直驱永磁风力发电系统的控制器参数优化的方法。

本文先在 Matlab/Simulink 中搭建直驱永磁风力发电系统的仿真模型, 仿真实验验证了模型的正确性。比较了发电机精确模型和简化模型的动态特性, 分

析了发电机模型的适用性。最后利用粒子群算法对永磁直驱风力发电系统的控制器参数进行优化设计, 改善了系统的动态特性。

## 1 直驱永磁风力发电系统模型

直驱永磁风力发电系统由风轮机、直驱永磁同步发电机(PMSG)、双 PWM 变换器等部分构成。结构如图 1 所示。

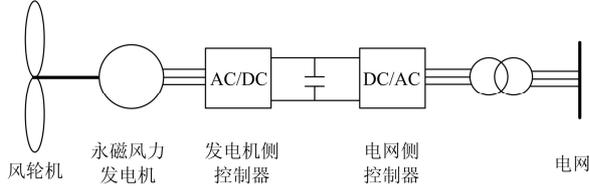


图 1 直驱永磁风力发电系统结构图

Fig. 1 Block diagram of direct-drive permanent magnet wind power system

### 1.1 风轮机模型

永磁风力发电系统通过“背靠背”变换器与电网相连, 从网络侧看不到发电机惯性。因此, 可将直驱永磁风轮机看做一个刚体, 采用一阶简化模型描述风轮机的动态<sup>[3]</sup>为

$$T_j \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

式中:  $T_j$  为风机系统惯性时间常数;  $P_m$  为风轮机输出的机械功率;  $P_e$  为发电机提供的电磁功率。

风轮机作为风力发电系统中的能量转换装置, 将具有不确定性、随机性的风能转换成机械能。由风轮机提供的机械功率可表示为<sup>[13-14]</sup>

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A c_p v_w^3 \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $A$  为风轮机叶片的接触面积;  $v_w$  为风速;  $c_p$  为风轮机输出功率系数, 即风轮机功率与风能的比值。

$c_p$  是桨叶节距角  $\beta$  和叶尖速度比  $\lambda$  的函数, 当桨叶节距角  $\beta$  不变时, 总有对应着最佳功率系数  $c_{pmax}$  的最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$ , 此时风轮机转换效率最高<sup>[13]</sup>。在风速变化时及时调节风轮机转速  $\omega$  (即发电机的转速), 维持  $\lambda = \lambda_{opt}$ , 可实现最大功率的跟踪<sup>[15-17]</sup>。

### 1.2 永磁发电机精确模型

永磁发电机本质上为同步发电机。取永磁体基波励磁磁场轴线为  $d$  轴, 设定输出电流方向为正, 发电机定子电压方程为

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega \psi_{sq} \quad (3)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega \psi_{sd}$$

式中:  $u_{sd}$ ,  $u_{sq}$  分别为发电机端电压的直、交轴分量;  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$  分别为发电机电流的直、交轴分量;  $\psi_{sd}$ ,  $\psi_{sq}$  分别为定子磁链的直、交轴分量;  $\omega$  为发电机转速。

$$\psi_{sd} = -L_s i_{sd} + \psi \quad (4)$$

$$\psi_{sq} = -L_s i_{sq}$$

式中:  $L_s$ ,  $R_s$  分别为发电机的电感和电阻;  $\psi$  为永磁体励磁磁链。

将式(4)代入式(3), 得到  $d$ ,  $q$  坐标系下发电机精确模型的电压方程为<sup>[18-19]</sup>

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} + L_s \omega i_{sq} \quad (5)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} - L_s \omega i_{sd} + \omega \psi$$

### 1.3 永磁发电机实用模型

电力系统动态分析计算中, 由于发电机定子的动态过程相对较短, 通常忽略发电机的定子暂态过程<sup>[20]</sup>, 即令

$$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} = 0 \quad (6)$$

将式(6)和式(4)代入式(3)中, 得到发电机实用模型的定子电压方程为

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} + L_s \omega i_{sq} \quad (7)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} - L_s \omega i_{sd} + \omega \psi$$

### 1.4 变换器及其控制器模型

永磁风力发电机通过一个全容量的“背靠背”变换器与电网相连, 其由发电机侧变换器、电容器和网络侧变换器构成。变换器结构如图 2 所示<sup>[3,21-22]</sup>。

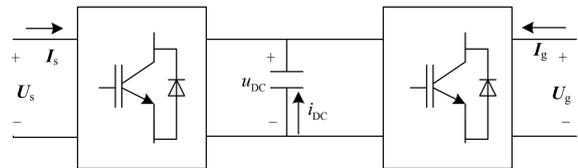


图 2 变换器结构图

Fig. 2 Block diagram of converter

图中:  $U_s$ ,  $I_s$  分别为发电机端电压和发电机侧控制器中的电流;  $U_g$ ,  $I_g$  分别为网络侧控制器端电压和网络侧控制器中的电流;  $u_{DC}$ ,  $i_{DC}$  分别为并联电容器两端电压和电容器电流。

发电机侧控制器的目标是获取最大的风能, 其

控制原理图如图 3 所示。控制器采用解耦控制策略<sup>[23]</sup>，控制 q 轴电流跟踪最大功率，控制 d 轴电流为 0，使发电机损耗达到最小。

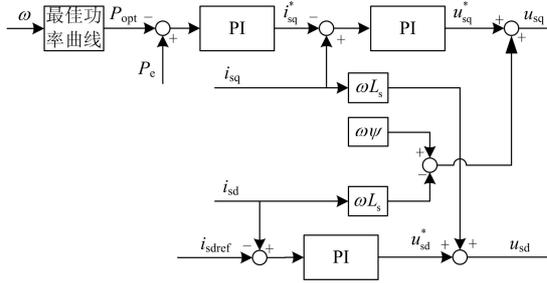


图 3 发电机侧控制器的控制原理图

Fig. 3 Block diagram of controller of generator side

图中： $P_{opt}$  为不同风速下通过调节风轮机转速  $\omega$  获得的最佳功率； $i_{sdref}$  为发电机侧电流直轴分量的参考值； $i_{sd}^*$  为经过 PI 控制器调节后的直轴控制电流； $u_{sd}^*$ 、 $u_{sq}^*$  分别为电压补偿前的发电机端电压直、交轴分量。

根据电网电压定向的矢量控制技术，将电网电压综合矢量定向在 d 轴，则电网电压在 q 轴上投影为 0。网络侧控制器的电压方程为<sup>[16]</sup>

$$u_{gd} - e_{gd} = -R_g i_{gd} - L_g \frac{di_{gd}}{dt} + L_g \omega_g i_{gq} \quad (8)$$

$$u_{gq} = -R_g i_{gq} - L_g \frac{di_{gq}}{dt} - L_g \omega_g i_{gd}$$

网络侧控制器的控制原理图如图 4 所示。网络侧控制器控制 d 轴电流，维持并联电容器两端电压恒定，从而保持“背靠背”变换器两端的功率平衡，控制 q 轴电流维持输出无功或者端口电压恒定<sup>[24]</sup>。

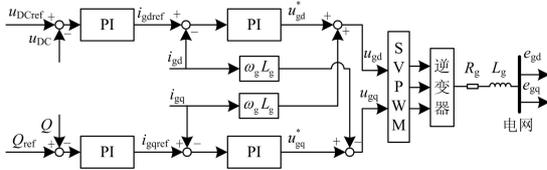


图 4 网络侧控制器的控制原理图

Fig. 4 Block diagram of controller of grid side

图中： $Q$  为网络侧控制器输出的无功功率； $Q_{ref}$  为网络侧输出无功功率的参考值； $u_{gd}$ 、 $u_{gq}$  分别为网络侧控制器端电压的直、交轴分量； $u_{gd}^*$ 、 $u_{gq}^*$  分别为电压补偿前的网络侧控制器端电压的直、交轴分量； $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  分别为网络侧电流的直、交轴分量； $i_{gdref}$ 、 $i_{gqref}$  分别为经过 PI 控制器调节后的网络侧直、交轴分量的参考值； $e_{gd}$ 、 $e_{gq}$  分别为电网电压的直、交轴分量； $\omega_g$  为电网同步电角速度； $L_g$  为连接风电系统和电网的变压器电感； $R_g$  为网络侧电阻。

## 2 仿真分析

### 2.1 系统仿真波形

由基础风、阵风、渐变风和随机风叠加而成的自然风作为直驱永磁风力发电系统的输入风速。在图 5 所示的输入风速下，直驱风力发电系统的动态如图 6 所示。

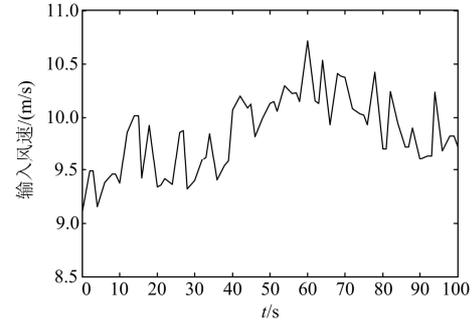
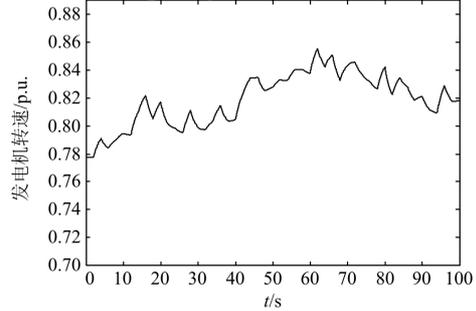
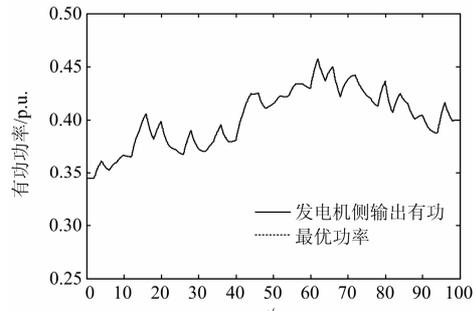


图 5 输入风速

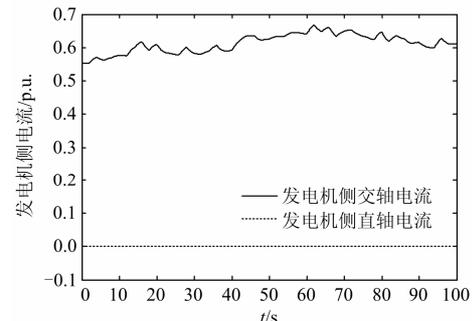
Fig. 5 Input wind speed



(a) 发电机转速



(b) 发电机侧输出有功与最优功率曲线



(c) 实时发电机侧电流响应

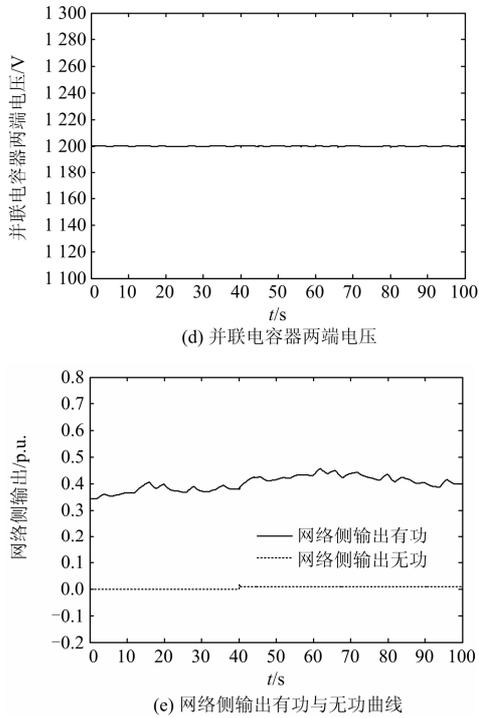


图 6 自然风速下直驱永磁风力发电系统仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of direct-drive permanent magnet wind power system under natural wind speed

由图6(a)、图6(b)看出,发电机转速随着输入风速的变化而变化,发电机侧输出有功功率曲线与最大功率追踪曲线吻合,表明发电机能够较好地跟踪最大风功率。图6(c)中发电机侧直轴电流控制在数值0附近,发电机的功率损耗达到最小。

根据图6(d),并联电容器电压维持在设定的基准值1200V附近,随着输入风速的变化小幅波动,网侧控制器能够维持发电机侧和网络侧的有功功率达到平衡。图6(e)中网侧无功输出维持在数值0附近。

## 2.2 发电机模型适用性比较

将发电机精确模型和实用模型分别与负载相连,设置负载电阻在100s时由1.4 pu突变至1 pu,风速维持10 m/s的恒定值。图7为两种模型下的发电机侧有功功率曲线。

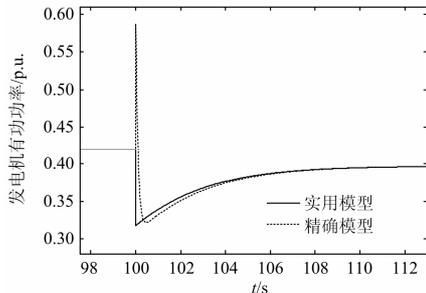


图 7 不同模型下的发电机有功功率曲线

Fig. 7 Generator active power curves under different models

图7中,精确模型在100s处波形变化明显。精确模型计及定子电磁暂态过程,当电阻负载下降时,电流应当增大。但由于发电机电压方程中存在电流微分过程,使电流不能突变,则通过在100s时端口电压上升以阻止电流增大,反映到发电机侧有功功率曲线上为瞬时激增。而实用发电机模型中忽略了定子暂态过程,发电机有功功率曲线无上升过程。

将发电机精确模型和实用模型,分别与变换器及其控制器相连,并入三相系统中。在40s处设置三相短路接地故障,经过0.01s退出故障。图8为网络侧有功功率输出曲线。

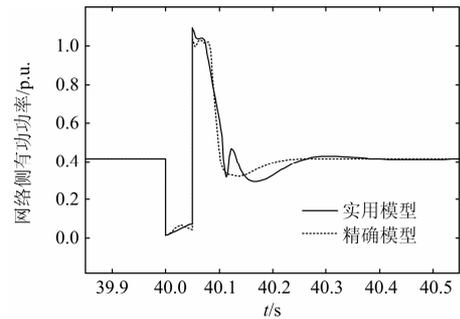


图 8 不同模型下的网络侧有功功率曲线

Fig. 8 Active power curves of network side under different models

由图8看出,当40s发生三相短路故障时,两种模型下的网络侧有功功率曲线基本吻合。

通过分析实用模型和精确模型在不同系统状态下的有功功率曲线,可以得出,分析发电机本身的动态问题时,应采用精确模型;而在进行并网计算时,实用模型和精确模型均可以准确描述。

## 3 直驱永磁风力发电系统优化控制

对于直驱永磁风力发电系统而言,控制器对发电系统的动态有重要影响<sup>[25]</sup>。在搭建仿真模型的过程中,设置合适的控制器参数能够有效地提高风力发电系统的动态性能<sup>[12,26]</sup>。本文通过对控制器参数进行优化来改善系统动态性能,取故障时刻网络侧控制器的直轴电流变化量为优化变量,将控制器参数集作为粒子,利用粒子群算法对网络侧三组控制器参数进行优化。

### 3.1 粒子群算法

粒子群算法是Kenney和Eberhart于1995年提出的一种智能优化算法,是一种思路简单,易于实现的高效率算法。自其提出以来,在电气工程以及其他学科得到广泛的应用。在电力系统领域,应用

传统的优化算法处理问题往往需要特定的公式，但粒子群算法可以通过微小的修正来适应不同种类的优化问题。

粒子群算法的核心思想是将一群随机初始化的粒子看做待解决问题的可行解，设定适应度函数来描述可行解的优劣。每个粒子在一定的空间范围内运动，由设定好的速度决定其运动方向和步长。通过比较其他粒子的历史最优点和自身的当前最优点，逐代寻优，最终获得最优解<sup>[27]</sup>。

### 3.2 粒子群算法在控制器参数优化中的应用

利用粒子群算法对网络侧控制器的三组控制器参数 ( $K_{pdc}$ ,  $K_{Idc}$ ,  $K_{pQ}$ ,  $K_{IQ}$ ,  $K_{pig}$ ,  $K_{Iig}$ ) 进行优化计算。

将直驱永磁风力发电系统连接至三相系统中，根据电网电压定向的矢量控制技术，在  $d, q$  坐标系下，将网侧变换器的有功功率  $P_g$  作为反映系统性能的动态指标<sup>[23]</sup>为

$$P_g = e_{gd} i_{gd} + e_{gq} i_{gq} = e_{gd} i_{gd} \quad (9)$$

式(9)中，网络侧有功功率  $P_g$  仅与电网电压  $e_{gd}$  和网络侧直轴电流  $i_{gd}$  有关，通过改变直轴电流可以改变网络侧有功功率。因此，将网络侧直轴电流  $i_{gd}$  在故障下的最大值作为优化目标，通过逐次迭代，使得电网发生故障时，网络侧直轴电流最大变化量达到最小，从而获得控制器参数的最优解。

具体实现过程如下：

(1) 初始化。根据位置和速度上下限设定每个粒子的位置  $z_i^{(0)}=(z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{i6})$  和速度  $v_i^{(0)}=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i6})(i=1, 2, \dots, N)$ 。并将初始时刻所有粒子的位置  $z_i^{(0)}$  保存到局部最优位置  $p_i^{(0)}$  中，以电流的最大值最小为目标，寻找全局最优位置  $p_g^{(0)}$ 。

(2) 根据每个粒子的适应值更新局部最优和全局最优位置。计算粒子适应度函数值，以此评价该粒子的优劣。将该粒子适应值与自身经历过的最好位置比较，优者存入  $p_i^{(k)}$ ；将其适应值与全局最好位置比较，优者存入  $p_g^{(k)}$ 。

(3) 依照式 (10) 更新每个粒子的速度和位置。

$$\begin{cases} v_i^{(k+1)} = w \cdot v_i^{(k)} + c_1 r_1 (p_i^{(k)} - z_i^{(k)}) + c_2 r_2 (p_g^{(k)} - z_i^{(k)}) \\ z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} + v_i^{(k+1)} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N \quad (10)$$

式中： $k$  为迭代次数； $w$  为惯性常数，反映当前粒子对原有速度的继承； $c_1$  和  $c_2$  为学习因子，分别代表粒子对自身历史最优点和群体最优点的靠拢； $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  之间均匀分布的随机数，体现群体的多样性。

(4) 判断结束或继续循环。若迭代次数达到  $M=50$ ，则迭代结束，否则，转到第 2 步继续执行。

参数设置为：迭代次数  $M=50$ ，粒子个数  $N=30$ ，惯性权重系数  $w=0.8$ ，学习因子  $c_1=c_2=2$ 。在 40 s 时系统发生三相短路接地故障，经  $15 \Omega$  故障电阻接地，经过 0.01 s 故障解除。

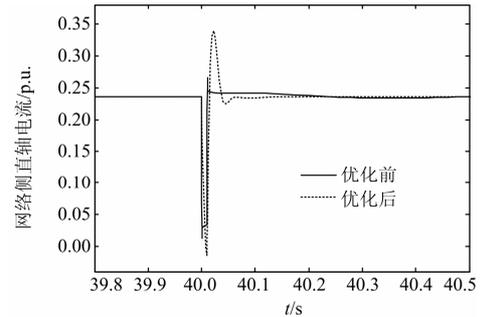
### 3.3 优化结果分析

本文在 Matlab/Simulink 中搭建直驱永磁风力发电仿真系统，编写粒子群算法程序，通过仿真模型与粒子群算法进行数据交换，交替迭代，达到对控制器参数进行逐级寻优的目标。优化前后的参数如表 1 所示。图 9 为优化前后在故障发生时刻网络侧的输出曲线。

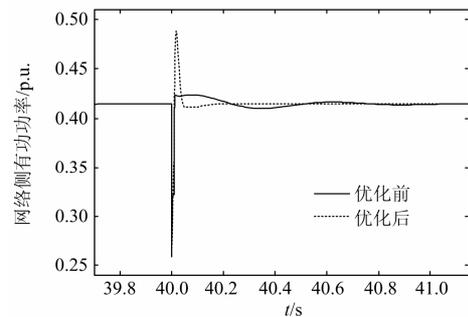
表 1 优化前后网络侧控制器参数对比

Table 1 Network controller parameters before and after parameter optimization

	$K_{pdc}$	$K_{Idc}$	$K_{pQ}$	$K_{IQ}$	$K_{pig}$	$K_{Iig}$
优化前	0.002 0	0.050 0	0.100 0	80.000 0	0.100 0	10.000 0
优化后	0.001 8	0.005 0	5.779 7	481.511 5	0.804 6	86.183 6



(a) 优化前后网络侧直轴电流曲线



(b) 优化前后网络侧有功功率曲线

图 9 参数优化前后网络侧输出曲线对比图

Fig. 9 Network outputs before and after parameter optimization

由图 9 可以看出，经粒子群算法优化后，有效地改善了系统动态特性。定义优化率计算公式为

$$\text{优化率} = \frac{i_{gd\max}(\text{优化前}) - i_{gd\max}(\text{优化后})}{i_{gd}(\text{稳态值})} \times 100\% \quad (11)$$

由仿真结果得出,  $i_{gdmax}$ (优化前)=0.339 6,  $i_{gdmax}$ (优化后)=0.266 1,  $i_{gd}$ (稳定值)=0.236 3, 因此, 该算例中优化率达到 31.1045%。

## 4 总结

本文依据直驱永磁风力发电系统中各模块控制策略, 在 Matlab/Simulink 中构建自然风速、风轮机、发电机、变换器及其控制器等模块, 获得系统仿真波形, 验证了模型的正确性。并对发电机精确模型和实用模型进行适用性比较: 当分析发电机本身的动态问题时, 可采用精确模型; 当进行并网计算时, 实用模型和精确模型均可以准确描述。最后利用模拟遗传算法中的粒子群算法对三组网络侧控制器参数进行优化, 改善了系统的动态响应。

## 参考文献

- [1] 赵梅花, 阮毅, 杨勇. 直驱式混合励磁风力发电系统控制策略的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 19-24.  
ZHAO Mei-hua, RUAN Yi, YANG Yong. Control strategy study on direct-driven type hybrid excitation wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 19-24.
- [2] 严干贵, 魏治成, 穆刚, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的直驱永磁同步风力发电机多机并联运行仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 39(7): 67-72.  
YAN Gan-gui, WEI Zhi-cheng, MU Gang, et al. Simulation of multi directly-driven permanent magnet synchronous generator parallel operation based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 39(7): 67-72.
- [3] 鞠平. 电力系统建模理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.
- [5] CHEN Zhe, JOSEP M G, FREDE B. A review of the state of the art of power electronics for wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(8): 1859-1878.
- [6] 黄守道, 肖磊, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统网侧变流器的运行与控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 173-180.  
HUANG Shou-dao, XIAO Lei, HUANG Ke-yuan, et al. Operation and control on grid-side converter of directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 173-180.
- [7] 邓秋玲, 黄守道, 姚建刚, 等. 直驱风电系统新型变流控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 227-234.  
DENG Qiu-ling, HUANG Shou-dao, YAO Jian-gang, et al. A new converter control strategy in direct drive wind generation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 227-234.
- [8] 杨晓波, 岳程燕, 谢海莲. 用于电磁暂态仿真分析的永磁同步发电机风电场模型聚合方法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 115-120.  
YANG Xiao-bo, YUE Cheng-yan, XIE Hai-lian. An aggregation method of permanent magnet synchronous generators wind farm model for electromagnetic transient simulation analysis[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 115-120.
- [9] PULGAR-PAINEMAL H A, SAUER P W. Towards a wind farm reduced-order model[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1688-1695.
- [10] 张宝群, 张伯明, 吴文传. 基于小于扰稳定的双馈感应发电机电磁模型降阶分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 51-55.  
ZHANG Bao-qun, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan. Small signal based reduced electromagnetic model analysis of doubly fed induction generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 51-55.
- [11] 严干贵, 魏治成, 穆钢, 等. 直驱永磁同步风电机组的动态建模与运行控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(6): 34-39.  
YAN Gan-gui, WEI Zhi-cheng, MU Gang, et al. Dynamic modeling and control of directly-driven permanent magnet synchronous generator wind turbine[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(6): 34-39.
- [12] HASANIEN H M, MUYEEN S. Design optimization of controller parameters used in variable speed wind energy conversion system by genetic algorithms[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 200-208.
- [13] 黄守道, 卢季宁, 黄科元, 等. 优化爬山算法在直驱永磁风力发电系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(9): 1221-1226.  
HUANG Shou-dao, LU Ji-ning, HUANG Ke-yuan, et al. Optimized hill-climb search algorithm applied to directly driven wind-turbine with permanent-magnet synchronous generator[J]. Control Theory and Applications, 2010, 27(9): 1221-1226.
- [14] LI H, LI Y, LI Z. A multiperiod energy acquisition model for a distribution company with distributed generation

- and interruptible load[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 588-596.
- [15] MESEMANOLIS A, MADEMLIS C, KIOSKERIDIS I. High-efficiency control for a wind energy conversion system with induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2012, 27(4): 958-967.
- [16] 王文亮, 葛宝明, 毕大强. 储能型直驱永磁同步风力发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 43-48, 78.  
WANG Wen-liang, GE Bao-ming, BI Da-qiang. Energy storage based direct-drive permanent magnet synchronous wind power control system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 43-48, 78.
- [17] 韩金刚, 陈昆明, 汤天浩. 半直驱永磁同步风力发电系统建模与电流解耦控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 110-115.  
HAN Jin-gang, CHEN Kun-ming, TANG Tian-hao. A research on modeling of half-direct coupling wind power system and decoupling current control[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 110-115.
- [18] 刘严, 袁越, 傅质馨. 直驱永磁风电场并网运行的小干扰稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(5): 1-6.  
LIU Yan, YUAN Yue, FU Zhi-xin. Small signal stability analysis of grid-connected direct-driven permanent-magnet wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(5): 1-6.
- [19] 廖勇, 何金波, 姚骏, 等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 29(18): 71-77.  
LIAO Yong, HE Jin-bo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 29(18): 71-77.
- [20] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分折[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [21] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.  
LI Jing, SONG Jia-hua, WANG Wei-sheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with larger capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [22] 肖磊, 黄守道, 黄科元, 等. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 123-129.  
XIAO Lei, HUANG Shou-dao, HUANG Ke-yuan, et al. DC voltage stability of directly-driven wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 123-129.
- [23] 李翀, 王明渝. 直驱永磁风力发电系统箝位式三电平变频器的控制和仿真[J]. 华东电力, 2010, 38(9): 1399-1404.  
LI Chong, WANG Ming-yu. Control and simulation on three-level NPC converters of wind turbine with direct-drive permanent magnet synchronous generator[J]. East China Electric Power, 2010, 38(9): 1399-1404.
- [24] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网交流技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
CHEN Yao. Research on full-scale grid-connected power conversion technology for direct-driven wind generation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [25] 胡江, 魏星. 基于自适应粒子群算法的直流输电 PI 控制器参数优化[J]. 电网技术, 2008, 32(26): 71-74.  
HU Jiang, WEI Xing. Parameter optimization of HVDC technology PI controller based on adaptive particle swarm optimization[J]. Power Systems Technology, 2008, 32(26): 71-74.
- [26] MUTLUER M, BILGIN O. Design optimization of PMSM by particle swarm optimization and genetic algorithm[C] // 2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA), 2012: 1-4.
- [27] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

收稿日期: 2013-08-05; 修回日期: 2013-09-05

作者简介:

管维亚(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋能综合发电系统研究; E-mail: gwy0928@163.com

吴峰(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事可再生能源发电系统的建模与控制等研究;

鞠平(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统建模与控制等研究。