黄 桦^{1,2},潘学萍²,李佳伟²,袁小明¹,鞠 平²

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074;2. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:针对直驱永磁风电机组,提出低电压穿越(LVRT)模型参数的整定方法。基于直驱永磁风电机组的通 用模型结构,计算各参数的轨迹灵敏度,获得 LVRT 模型的关键参数。指出由于参数的非线性特性,现有的 基于轨迹灵敏度的参数辨识方法难以适用。为此,提出将参数调整与参数优化相结合的参数整定方法。以 某直驱永磁风电机组为例,基于实测数据进行了参数整定及模型验证,并进行了其他扰动场景下的适应性分 析,结果验证了所提方法的可行性和有效性。

0 引言

合适的风电机组模型及准确的参数是仿真分析 含高比例风力发电电力系统动态特性的基础^[1-3]。 早在 2009 年,美国电科院(EPRI)、美国西部电力协 调委员会 WECC(Western Electricity Coordinating Council)建模工作组提出了 4 种类型的风电机组通用模 型结构,后经不同厂家的实测验证与模型改进,于 2014 年又提出了第二代风电机组的通用模型^[4-7], 并将该通用模型应用到 PSS/E、PSLF 等电力系统仿 真平台^[8-9]。文献[10-11] 对 WECC 提出的风电机 组通用模型进行了讨论及适应性评述。国内中国电 力科学研究院、河海大学等^[12-13]也在这一方面做了 有意义的工作。

风电机组的参数整定与模型验证是检验仿真 模型是否准确的前提。文献[14]从扰动的确定、观 测量的选择以及参数辨识方法的选择等因素出发, 给出了风电机组参数辨识的框架以及流程。文献 [15]总结对比了各国实测、验证风电机组模型的做 法。部分厂家的风电机组模型校核方法^[16-17]也值得 借鉴,如 ABB 公司以发电机出口处的电压跌落为激 励信号,根据实测数据验证直驱永磁风电机组的模 型参数^[18];GE 公司通过在发电机出口处的电压施 加阶跃信号/投切风电场内的电容器组等手段施加 激励信号进行模型校核^[19]。

上述风电机组的参数整定或模型验证都侧重于 连续参数,尚未有对导致风电机组非平滑动态特性 的参数进行整定的研究报道。而从 WECC 公布的 直驱风电机组的模型结构可以看出:控制器中存在 限幅、死区环节,且在不同电压跌落程度下系统存在 动态切换等离散事件。文献[20]强调,双馈/直驱

收稿日期:2018-08-02;修回日期:2019-01-05

基金项目:新能源发电与智能电网"111"引智计划(B14022) Project supported by the "111" Project of Renewable Energy and Smart Grid(B14022) 风电机组本身为混杂系统,其非线性特性使得风电机组的动态特性尤为复杂。

本文针对直驱永磁风电机组在低电压穿越 (LVRT)期间的逻辑控制模块各参数提出参数整定 方法。由于 LVRT 期间的控制策略中存在的限幅、 死区等非线性参数可能导致风电机组的动态轨迹非 平滑,适用于辨识常规参数的轨迹灵敏度方法将不 再适用。为此,本文采用启发式方法与优化方法相 结合的思路,对于导致风电机组非平滑动态的非线 性参数,先采用参数调整的方法获得其初始值,进一 步进行曲线拟合,从而获得参数结果。

1 LVRT 模型参数的灵敏度分析

WECC 推出的直驱永磁风电机组(Type 4)通用 模型结构见附录中图 A1,其包括驱动系统(wtgt_a)、 转子侧控制环节(reec_a)、发电机以及网侧变流器 (regc_a)和场站级控制(repc_a)4个模块。其中 regc_a和 reec_a的模型结构分别见图1和图2,各参 数定义见文献[8]。

1.1 LVRT 期间风电机组的控制策略

从图 1、2 可见:风电机组的控制环节除了正常

故障后无功电流恢复速率限幅:





图 2 reec_a 的模型结构 Fig.2 Model structure of reec_a

情况下的物理控制模块外,还包含 LVRT 期间的逻辑控制模块。两者间的切换规则为:当风电机组出口处电压高于某值(如 $0.9U_N, U_N$ 为额定电压)时, Voltage_dip=0,机组处于正常的控制模式;当出口处的电压跌落低于该值时,Voltage_dip=1,正常控制模块被冻结,而由 LVRT 期间的逻辑控制模块主导。因此风电机组在 LVRT 期间,逻辑控制模块的参数 对风电机组的全过程动态特性影响较大。图 1、2 中,风电机组在 Voltage_dip=1 期间的模型参数与低电压有功电流管理模块(LVACM)、低电压功率逻辑模块(LVACM)、低电压功率逻辑模块(LVPL)以及无功控制模块密切相关,各参数及 其定义见表 1。

表1 电压跌落及恢复期间的关键参数

Table 1 Key parameters during voltage sag and recovery

模块	参数	含义			
有功模块	V _{Lvpnt0}	当电压低于 V _{Lvpnt0} 时,有功电流比例系数为0			
	$V_{\rm Lvpnt1}$	当电压高于 V _{Lvpntl} 时,有功电流比例系数为1			
	$Z_{ m erox}$	功率过零点时的电压			
	$B_{ m rkpt}$	LVRT 模型电压限幅上限值			
	I_{pmax}	有功电流最大值			
	$T_{\rm hld2}$	有功电流最大值的保持时间			
	$V_{\rm rrpwr}$	有功电流恢复速度			
无功模块	K_{qv}	K _{qv} 电压跌落期间的无功电流放大倍数			
	$T_{ m hld}$	电压恢复期间的无功电流保持时间:若 T _{hld} >0,则			
		I_{qinj} 保持在数值 I_{qfrz} 的时间为 T_{hld} ;若 $T_{hld} < 0, 则 I_{qinj}$			
		保持在电流注入状态的时间为 T_{hld} ;若 T_{hld} =0,则			
		I _{qinj} 立刻恢复为0			
	$I_{q\mathrm{frz}}$	无功冻结电流			
	$I_{q\text{rmax}}$	电压跌落瞬间无功电流的上升速率			
	$I_{q\mathrm{rmin}}$	电压跌落瞬间无功电流的下降速率			

1.2 参数的轨迹灵敏度

轨迹灵敏度^[13]分析能提供参数辨识的难易程 度信息以及参数的可辨识性信息。下文以直驱永磁 风电机组接入无穷大系统为例,仿真其电压跌落至 80%U_N以下的受扰轨迹,并计算各参数的轨迹灵敏 度,结果见图 3、4(图中轨迹灵敏度为标幺值)。







图 4 无功参数的轨迹灵敏度

Fig.4 Trajectory sensitivities of reactive parameters

由图 3、4 可知,风电机组的有功与无功动态特 性受 LVRT 控制逻辑中各参数的影响,其中参数 V_{Lvpnt0}、V_{Lvpnt1}、Z_{erox}、B_{rkpt}、I_{pmax}、T_{hid2}和 V_{rrpwr}影响有功功 率的全过程动态特性,参数 K_{qv}、I_{qfrx}、T_{hid}影响无功功 率的动态特性。该算例和其他一些算例的结果表明 这些参数是关键参数。但在实际运行中由于技术保 密或人为调节等原因,风电机组的控制方式及参数 一般无法直接获得,或参数与实际运行有较大的偏 差。为了准确地仿真风电机组的全过程动态特性, 需通过参数整定获取 LVRT 模型的关键参数。

2 LVRT 模型参数的整定方法

由于 LVRT 期间风电机组的逻辑控制环节存在 限幅、死区,且在不同电压跌落程度下系统动态存在 切换等离散事件。这些非线性参数在不同数值下的 受扰轨迹常出现不同的非平滑特征,给参数整定带 来了较大的困难。以参数 *K*_q,为例,不同 *K*_q,取值下的 无功功率响应见图 5(图中无功功率 *Q* 为标幺值)。



图 5 不同 K_a取值下风电机组的无功功率动态特性

Fig.5 Reactive power dynamic characteristic of wind turbine generator under different values of K_{av}

由图 5 可见,当 K_{qr} 取值为 2.0、1.8 时,风电机组 无功功率的受扰轨迹非常相近,而当 K_{qr} 降低到 1.6 时其受扰轨迹明显不同。这是因为当 K_{qr} 超过一定 的数值时,无功电流限幅环节的作用使得受扰轨迹 基本一致;而当 K_{qr} 为较小值时,限幅环节不再起作 用,无功功率的受扰轨迹会发生明显的变化。所以, 基于 K_{qr} =2.0 情况下的轨迹灵敏度结果辨识 K_{qr} =1.6 情况下的参数,有可能产生较大的误差。

为此,本文提出将参数调整与参数优化相结合的思路:首先根据受扰期间各时段的关键参数,基于 受扰轨迹对各参数进行调整;然后,将调整结果作为 初始值,采用优化方法辨识上述参数,从而获得各参 数的整定值。

由于各参数对风电机组动态过程中各时段的灵 敏度不同,需要对动态过程进行分区。依据我国行 业标准 NB/T31053,以实测电压数据为依据,将风电 机组的受扰轨迹分为故障前(A)、故障期间(B)以 及故障后(C)3 个分区,见图 6。



图 6 风电机组动态过程分区

Fig.6 Partition of wind turbine generator's dynamic process (1)参数调整。

当进行参数调整时,针对不同时段的关键参数 进行有针对性的粗调,基本步骤如下:

a. 根据实测数据,获得某故障下风电机组端口的电压跌落、有功功率和无功功率动态实测数据;

b. 设置与实测数据一致的风电机组运行状态 及电压跌落幅度,仿真获得风电机组在典型参数下 的受扰轨迹,并与实测有功功率及无功功率受扰曲 线进行对比;

c. 由于在分区 B 内有功参数轨线灵敏度较大的 参数为 *V*_{Lvpnt0} 和 *V*_{Lvpnt1},所以粗调这 2 个参数以模拟 分区 B 的有功功率;

d. 调整分区 C 内有功功率的起点参数 Z_{erox} ,模 拟有功功率的恢复"起点";

e. 调整分区 C 内的有功参数 T_{hld2}以及 V_{rrpwr},使 得在有功功率恢复过程中保持 I_{pmax}值的时长为 T_{hld2} 后,以斜率 V_{rrpwr}恢复至故障前的状态;

f. 调整分区 B 开始阶段的无功功参数 I_{qmax},用 以调整瞬间无功功率的上升速率;

g. 调整参数 K_{ax} ,模拟分区 B 无功功率的数值;

h. 调整参数 *I*_{qfrz}以及 *T*_{hld},获得分区 C 内无功功 率的设定值以及该设定值的持续时间。

参数调整的原则为:①确定动态全过程中不同 分区下的关键参数,如电压跌落期间与有功功率动 态强相关的参数为 $\{V_{Lxpnt0}, V_{Lxpnt1}, I_{pmax}\}$,电压恢复期 间与有功功率动态强相关的参数为 $\{Z_{erox}, B_{rkpt}, I_{pmax}, T_{hd2}, V_{rrpwr}\}$,与无功功率动态强相关的参数为 $\{K_{qr}, I_{qfrz}, T_{hdd}\}$;②根据图 3、4 所示的轨迹灵敏度结果以 及仿真曲线与实测曲线的差异情况进行调整,如果 参数的灵敏度大于 0 且仿真曲线低于实测曲线,则 参数上调,反之则下调。调整策略采用二分法^[21], 最终获得参数的粗调结果。

(2)参数辨识。

在上述参数调整的基础上,进一步采用改进粒

子群优化(PSO)算法进行参数辨识,目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^{K} \{ w_1 [P_{sim}(i) - P_{real}(i)]^2 + w_2 [Q_{sim}(i) - Q_{real}(i)]^2 \}$$
(1)

其中,P 和 Q 分别为有功功率和无功功率;下标 sim 和 real 分别表示仿真与实测数据;*i*表示第*i*个数据 采集点;*K* $为数据采集的总点数;<math>w_1$ 和 w_2 分别为有 功拟合和无功拟合的权重。 w_1 和 w_2 的确定方法 为:当辨识有功参数受扰轨迹灵敏度大的参数时,权 重系数 $w_1=1,w_2=0$;当辨识无功参数受扰轨迹灵敏 度大的参数时,权重系数 $w_1=0,w_2=1$ 。基于改进 PSO 算法的参数辨识流程见图 7。综上,通过参数 调整及参数优化可获得各参数的整定值。





3 LVRT 模型参数的实测验证

本文基于金风科技 GW1500/82 直驱永磁风电 机组的现场实验数据进行模型验证。实验时处于大 风状态,机组的稳态有功出力接近额定值,通过 LVRT 实验设置扰动,见图 8。图 8 中,电网采用等 效电压 U_c 及电网侧接入阻抗 Z_c 表示;电压跌落设 备包括限流阻抗 Z_1 、短路阻抗 Z_2 以及开关 S_1 和 S_2 , 调节 Z_2 可设置不同的电压跌落; MP₁—MP₃ 为测量 点,本文以测量点 MP₃ 的有功功率和无功功率实测 数据进行模型验证。



3.1 参数整定

基于第2节的参数整定流程,采用机端电压跌 落到0左右扰动下的实测功率轨迹。首先,针对风 电机组全过程动态的各分区,采用参数调整方法调 整对应的关键参数,获得各参数的初始值;然后,基 于 PSO 算法,根据有功功率受扰轨迹,优化对应的 参数 $\{V_{Lepnt0}, V_{Lepnt1}, Z_{erox}, B_{rkpt}, I_{pmax}, T_{hld2}, V_{repwr}\}$,再根 据无功功率受扰轨迹,优化对应的参数 $\{K_{qv}, I_{qfrz}, T_{hld}\}$;最后,基于参数整定结果进行仿真,获得仿真 与实测动态全过程的特性曲线,如图9所示(图中纵 轴为标幺值,后同)。由图9可见,基于参数整定结 果的风电机组受扰轨迹与实测动态曲线较吻合,验 证了上述参数整定方法的可行性。



Fig.9 Measured and simulative dynamic characteristic curves

3.2 模型适应性验证

为了进一步验证上述参数整定结果的适应性, 进一步对比其他电压跌落程度下的仿真结果及实测 轨迹。

a. 误差指标。

定义仿真轨迹与实测轨迹之间的误差指标如下:

$$E_{f_{-}\Omega} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=K_{\text{start}_{-}\Omega}}^{K_{\text{end}_{-}\Omega}} [Y_{\text{m}}(i) - Y_{\text{s}_{-}f}(i)]^{2}} \times 100\%$$
(2)

其中, $E_{f_{\Omega}}$ 为故障 f 下分区 Ω 的误差指标; $Y_{m}(i)$ 和 $Y_{s_{f}}(i)$ 分别为第 i 个有功或无功功率的实测值和仿 真值(标幺值); $K_{star_{\Omega}}$ 和 $K_{end_{\Omega}}$ 分别为分区 Ω 内首个 数据和最后一个仿真/实测数据的序号;n 为分区 Ω 内所有数据的总个数。 b. 模型适应性评价。

基于电压跌落到 0 扰动下的参数整定结果, 仿 真电压跌落至其他场景(20% U_N、35% U_N、50% U_N) 下的动态轨迹, 并与实测结果进行对比, 仿真与实测 曲线见图 10, 偏差见表 2。由此可见, 参数整定结果 在其他扰动场景下也具有较好的适应性, 能反映不 同电压跌落场景下风电机组的全过程有功功率和无 功功率动态特性。



图 10 不同电压跌落程度下的实测和仿真曲线

Fig.10 Measured and simulative curves under different voltage sag degrees

Table 2 Error under different voltage	sag	degrees
---	-----	---------

电压跌落程度	分区	有功误差/%	无功误差/%
20% 1	В	8.03	4.09
20% U _N	С	3.91	9.90
350% 11	В	10.11	3.89
55 % U _N	С	4.77	9.09
50% U	В	11.33	4.58
5070 U _N	С	7.48	8.90

4 结论

针对直驱永磁风电机组的 WECC 通用模型,分 析了 LVRT 期间控制模块的关键参数,提出将参数 调整与参数优化相结合的参数整定方法。

基于金风科技 GW1500/82 直驱永磁风电机组 的实测数据,对 LVRT 期间的模型参数进行了整定, 结果验证了本文所提方法的可行性。

根据其他电压跌落场景下的实测数据,基于某 一故障场景下的参数辨识结果进行了模型适应性及

误差分析,结果验证了本文所提方法的有效性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]张保会,李光辉,王进,等.(二)双馈式风电场电磁暂态等值建模研究[J].电力自动化设备,2015,35(2):1-7.
 ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (2): DFIG-based wind farm electromagnetic transient equivalent model[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):1-7.
- [2]杨茂,杨琼琼.风电机组风速-功率特性曲线建模研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(2):34-43.
 YANG Mao,YANG Qiongqiong. Review of modeling of wind speed-power characteristic curve for wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(2):34-43.
- [3]潘学萍,殷紫吟,鞠平,等. 基于短路电流辨识双馈感应发电机 的模型参数[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):27-31.
 PAN Xueping,YIN Ziyin,JU Ping, et al. Model parameter identification of DFIG based on short circuit current[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):27-31.
- [4] WECC Renewable Energy Modeling Task Force. WECC wind power plant dynamic modeling guide[R]. Knoxville, USA; EPRI, 2010.
- [5] POURBEIK P. Model validations attempts for the type 3 generic model structure-review of proposed changes by Games[R]. [S.l.]: WECC REMTF, IEC TC88WG27, 2012.
- [6] WECC Renewable Energy Modeling Task Force. Pseudo governor model for type 1 and 2 generic turbines [R]. Knoxville, USA; EPRI, 2012.
- [7] POURBEIK P. Proposed changes to the WECC WT4 generic model for type 4 wind turbine generators [R]. Knoxville, USA: EPRI, 2013.
- [8] SIEMENS PTI. PSS/E model library of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA: [s.n.], 2009.
- [9] SIEMENS PTI. Program application guide of PSS/E-32[R]. Schenectady, NY, USA; [s.n.], 2009.
- [10] 张磊,朱凌志,陈宁,等.风力发电统一模型评述[J].电力系统 自动化,2016,40(12):207-215.
 ZHANG Lei, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. Review on generic model for wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):207-215.
- [11] 陈武晖,王龙,谭伦农,等. WECC 风力发电机组/场通用动态模型研究进展[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):738-750. CHEN Wuhui, WANG Long, TAN Lunnong, et al. Recent progress of developing WECC generic models of wind turbine generators/ plants for dynamic simulation[J]. Proceedings of the CSEE,2017, 37(3):738-750.
- [12] 訾鹏,周孝信,田芳,等.双馈式风力发电机的机电暂态建模
 [J].中国电机工程学报,2015,35(5):1106-1114.
 ZI Peng,ZHOU Xiaoxin,TIAN Fang, et al. Electromechanical transient modeling of wind turbines based on doubly-fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(5):1106-1114.
- [13] 潘学萍, 鞠平, 吴峰, 等. 双馈风电机组模型结构讨论[J]. 电力 系统自动化, 2015, 39(5): 7-14.
 PAN Xueping, JU Ping, WU Feng, et al. Discussion on model structure of DFIG-based wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 7-14.
- [14] 鞠平,吴峰,金宇清,等. 可再生能源发电系统建模与控制[M].

北京:科学出版社,2014:86-108.

160

- [15] ASMINE M, BROCHU J, FORTMANN J, et al. Model validation for wind turbine generator models [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1769-1782.
- [16] BROCHU J, LAROSE C, GAGNON R. Validation of single- and multiple-machine equivalents for modeling wind power plants[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(2):532-541.
- [17] LANGLOIS C E, LEFEBVRE D, DUBÉ L, et al. Developing a type-III wind turbine model for stability studies of the Hydro-Quebec network [C] // Proceedings of 8th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Farms. Bremen, Germany: Energynautics, 2009:674-679.
- [18] SEMAN S, NIIRANEN J, VIRTANEN R, et al. Low voltage ridethrough analysis of 2 MW DFIG wind turbine-grid code compliance validations [C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA; IEEE, 2008; 1-6.
- [19] MILLER N, CLARK K, MACDOWELL J, et al. Experience with

field and factory testing for model validation of GE wind plants[C]// Proceedings of Europe Wind Energy Conference Exhibition. Brussels, Belgium: EWEA, 2008:1-9.

- [20] HISKENS I A. Dynamics of type-3 wind turbine generator models
 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1):465-474.
- [21] 葛少云,李建芳,张宝贵. 基于二分法的配电网分段开关优化配置[J]. 电网技术,2007,31(13):44-49.
 GE Shaoyun,LI Jianfang,ZHANG Baogui. Optimal configuration of sectional switches in distribution network based on bisection method [J]. Power System Technology,2007,31(13):44-49.

作者简介:



黄 桦(1989—),女,江苏靖江人,博 士研究生,主要研究方向为新能源发电系统 建模与控制(E-mail;hua.h@hotmail.com); 潘学萍(1972—),女,安徽天长人,教 授,博士,主要研究方向为新能源发电系统

建模(E-mail:xueping_pan@163.com)。

Parameter setting method and measurement verification of LVRT model for direct drive permanent magnet wind turbine generator

HUANG Hua^{1,2}, PAN Xueping², LI Jiawei², YUAN Xiaoming¹, JU Ping²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A parameter setting method of LVRT(Low Voltage Ride-Through) model is proposed for direct drive permanent magnet wind turbine generators. The trajectory sensitivity of each parameter is calculated based on the universal model structure of direct drive permanent magnet wind turbine generator and the key parameters of LVRT model are obtained. It is pointed out that the existing parameter identification methods based on trajectory sensitivity are difficult to be applied because of the nonlinear characteristics of parameters. Therefore, a parameter setting method combined with parameter adjustment and parameter optimization is proposed. The parameter setting and model verification are taken out based on the measured data of a direct drive permanent magnet wind turbine generator and the adaptability under other disturbance scenarios is analyzed. The results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: direct drive permanent magnet wind turbine generator; LVRT; parameter setting; measurement verification; trajectory sensitivity; adaptation analysis; models



图A1 直驱永磁风电机组的通用模型结构 Fig.A1 Structure of universal model for direct drive permanent magnet wind turbine generator