

基于改进遗传算法的双馈风电机组模型参数辨识

建立准确的风电机组数学模型是开展风电并网研究的基础,而风电机组模型的建立通常需借助于辨识建模。通过参数灵敏度分析确定模型中影响风机并网特性的关键参数,提出一种基于改进遗传算法的风电机组模型关键参数辨识方案。基于DIgSilent/Power Factory软件实现风机模型的搭建及并网特性的仿真,在Matlab环境下实现遗传算法的编写,并通过软件接口实现两种软件的数据交换,完成参数寻优。结果表明:经参数辨识后,所搭模型可准确地反应风机在低电压穿越中的并网特性;所提方案切实可行,为风电机组模型的参数辨识提供了一种有效的新方法,具有重要的工程使用价值。

孙建华¹ 王东华² 朱 印¹/1.江苏苏美达新能源发展有限公司 2.国网山东省电力公司莱芜供电公司



孙建华/高级工程师

我国风电近年发展迅猛,发展规模和发展速度均处于全球领先地位,截至2010年底,我国累计安装风电机组34 485台,风电总装机容量达到4 473万kW,装机规模跃居世界第一位,成为全球风电装机容量最高、新增装机容量最多和增长速度最快的国家。随着风电装机的逐渐增加,风电并网对电力系统安全稳定运行和电能质量的影响也越来越突出。2011年2月24日、4月17日和4月25日甘肃酒泉风电基地连续三次大规模风电机组脱网事故中,风电机组的脱网容量均超过80万kW,如此频繁的大规模风电脱网对电力系统安全稳定运行构成了严重威胁。为了促进风电的健康发展,保证大型风电场的可靠并网运行,有必要从电网的角度对风电场规划及其并网技术,风电场运行对电网稳定性和电能质量影响问题进行研究,而建立合适及准确的风电机组数学模型是开展这些研究的

关键基础。目前,国际上IEC-TC88-WG27风力发电建模工作组、美国WECC建模工作组等研究组织或机构均在开展风电机组/风电场的建模工作^[1],其主旨思想均是为了提供一个用于机电暂态稳定性研究的风电机组模型,通过模型参数的调整,可反映不同风机制造商生产的风机在各种工况下的并网特性。

双馈风电机组模型的建立应借助于辨识建模,辨识建模属于灰箱建模的范畴。目前,国内外针对双馈风电机组模型的参数辨识研究,尚且不多。但在其他领域,已开展过很多参数辨识的相关研究,参数辨识的理论也已比较成熟,主要可分为两类:

1) 经典辨识方法。主要包括频域法、最小二乘法、极大似然法、卡尔曼滤波法和分段线性多项式函数法等。

2) 现代辨识法。包括模拟进化算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法和人工神经网络算法等^[2-3]。其中模拟进化算法主要包括遗传算法、进化策略、进化规划、粒子群算法、蚁群算法和差分演化算法等^[4-5]。

由于风机模型中含有大量的非线性环节,传统的经典辨识方法已经难以适应。模拟进化算法等现代辨识方法,不受非线性环节的影响,搜索能力强,是目前参数辨识领域的主流方法。其中应用最广的莫过于遗传算法,文献[6-11]等将遗传算法应用在电力系统四大参数的建模及辨识中,取得了良好的效果;文献[12-14]在进化算法研究的专业领域对

关键词/Keywords

双馈风电机组·
参数辨识·
改进遗传算法·
参数灵敏度分析·
低电压穿越·

遗传算法提出了各种改进策略,效果甚佳。在总结前人成果的基础上,本文提出一种改进的遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA),将其应用于风电机组模型关键参数的辨识中,辨识结果表明,其全局搜索能力强、收敛速度快,所搭建的风电机组模型经参数辨识后可准确地反映风

机在低电压穿越中的并网特性。

风电机组模型结构

本文在DIgSilent/Power Factory软件中搭建了双馈感应式风力发电机组的仿真模型^[15-17],其结构示意图如图1所示。

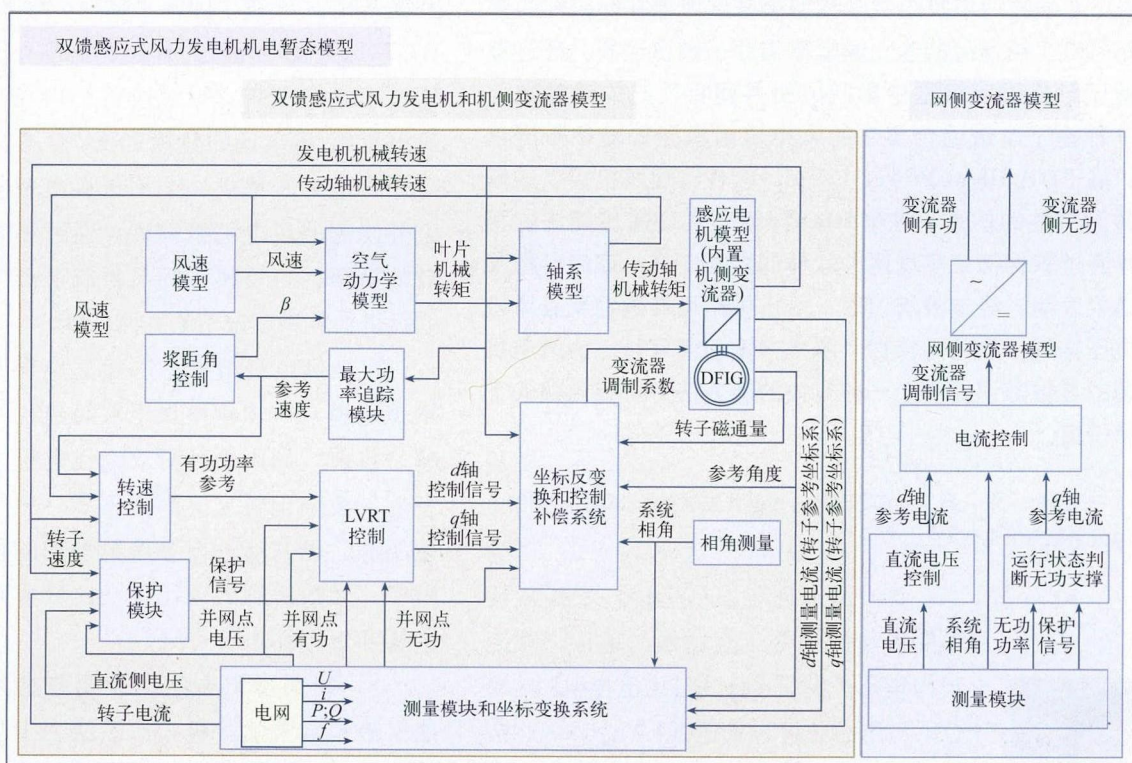


图1 双馈感应式风力发电机组模型结构示意图

所搭模型具有如下特征:

1) 适用于电力系统机电暂态仿真,仿真步长可在1 ms~1 s的范围内灵活调节。

2) 具备低电压穿越能力。模型采用带Crowbar保护的故障穿越解决方案,该方案主要基于转子侧变换器的闭锁和重起动。这意味着当电网电压下降,出现暂态过电流时,转子侧变换器闭锁且转子回路通过短路棒短接。当转子侧变频器闭锁时,它将失去控制能力。当检测到暂态过电流消失后,转子侧变换器重起动,返回正常控制运行状态。即在暂态过电流过后,转子侧变频器即可恢复正常工作,使得转子侧变频器可以在一定范围内提供无功功率并支持电网电压重建。在故障恢复阶段,有功功率和无功功率可按指定

的斜率恢复至稳态值。

3) 保护方案涵盖电压、电流以及发电机转速,在超出指定值时可将风机切除。

模型参数灵敏度分析

由于风电机组模型复杂,涉及众多模块和参数,为了确定较为重要的参数,分析参数的改变对风机并网特性影响,需要对参数进行敏感度分析,即观察参数变化对风机并网特性的影响。

实现方法:在DIgSilent/Power Factory中搭建模型,并使用软件内置的DPL(DIgSilent Program Language)语言编写程序实现循环仿真,观察参数变化对风机在低电压穿越过程中并网特性的影响。关键参数整理如表1所示。

表1 模型关键参数

模块	参数名	参数描述
LVRT控制	Kd	d轴PI控制器的比例系数
LVRT控制	Td	d轴PI控制器的时间常数
LVRT控制	Kq	q轴PI控制器的比例系数
LVRT控制	Tq	q轴PI控制器的时间常数
LVRT控制	T_limit	有功功率限制时间/s
LVRT控制	I_limit	电流限制 (pu)
LVRT控制	T_climb	有功功率爬升时间/s
LVRT控制	K_climb	爬升斜率限制/pu/s
LVRT控制	K_ip	有功电流比例系数 (pu)
LVRT控制	K_iq	无功电流比例系数 (pu)
转速控制	Kptrq	PI控制器的比例系数
转速控制	Kitrq	PI控制器的积分系数
转速控制	Tpc	输出限制时间常数/s
保护模块	CrowbarR	短路棒电阻值 (pu)
保护模块	CrowbarT	短路棒最小投入时间/s

其中,故障设置为并网点发生三相接地短路,电压跌落到0.2 pu,故障持续时间为0.625 s。

参数辨识算法研究

遗传算法是根据生物进化“适者生存、优胜劣汰”的原理,对实际问题的解进行个体编码,反复地在进化过程中将选择算子、交叉算子和变异算子作用于群体,最终得到所求问题的最优解或近似最优解。

1. 遗传算法的继承

1) 编码。实数编码。直接将待优化的模型参数相互连接,形成IGA算法中的个体。

2) 适应度函数。Rank法。在基于排序的适应度分配中,种群按目标函数值进行排序。适应度仅仅取决于个体在种群中的序位,而不是实际的目标函数值^[18]。

3) 选择算子。最优保存法和轮盘法结合使用。最优保存法的思想是把群体中适应度最高的个体(精英个体)不进行交叉变异而直接复制到下一代中去。其优点是进化过程中某一代的最优解可不被交叉和变异操作所破坏;缺点是局部最优个体的遗传基因会急速增加而使进化有可能限于局部解,即全局搜索能力差^[19]。因此,本文将最优保存法和轮盘法结合使用。在轮盘法中,各

个个体的选择概率和其适应度值成比例。

2. 遗传算法的改进

(1) 交叉算子: 启发式交叉

基于线性交叉原理,提出了改进的启发式交叉算子。假设父个体 P_1 比 P_2 适应度高,则对两者进行启发式交叉后,得出子个体的计算公式为

$$C = P_1 + R(P_1 - P_2) \quad (1)$$

式中, C 为父个体交叉产生的子个体; R 为0~1之间的随机值; P_1 、 P_2 分别为父个体1与父个体2,且 P_1 比 P_2 的适应度高。

假设解空间为二维空间,则两者经启发式交叉后,子个体 C 可能的位置如图2所示。

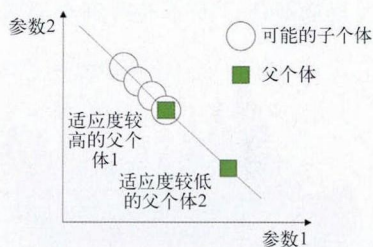


图2 启发式交叉

(2) 变异算子: 自适应变异

基于高斯变异原理,提出了改进的自适应变异算子,计算公式为

$$M = P + SD \quad (2)$$

式中, M 为父个体变异产生的子个体; P 为父个体; S 为变异步长; D 为进化方向。

其中变异步长和进化方向不是固定不变的,而是随群体中个体的多样性程度自适应调整。假设解空间为二维空间,则经自适应变异后,子个体 M 可能的位置如图3所示。

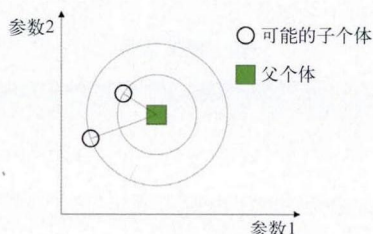


图3 自适应变异

3. 进化策略

综上所述,本文采用的进化策略(即种群再生策略)为

$$O = E + C + M \quad (3)$$

式中, O 为子代种群; E 为父代种群中选择出的精英个体; C 为父代种群中选择出的父个体进行启发式交叉产生的子个体; M 为父代种群中选择出的父个体经自适应变异产生的子个体。

4. 算法测试

测试函数Rastrigin's Function, 计算公式为

$$Ras(x) = 20 + x_1^2 + x_2^2 - 10(\cos 2\pi x_1 + \cos 2\pi x_2) \quad (4)$$

式中, x_1 、 x_2 为变量。

由图4可见, 此函数的全局最优值为 $[0,0]$, 但是它拥有非常多的局部最小值点和局部最大值点, 对各类寻优算法具有很强的欺骗性, 很容易使算法陷入局部最优, 而不能得到全局最优解。

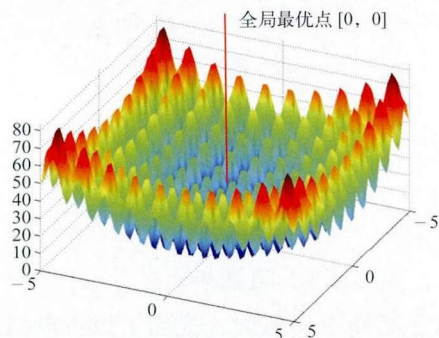


图4 Rastrigin函数

本节将用此函数对模拟退火算法、普通遗传算法和改进遗传算法分别进行测试。模拟退火算法参考文献[3]提供的源程序在Matlab环境下实现, 普通遗传算法采用比较常见的线性交叉算子和高斯变异算子在Matlab环境下实现。测试结果如表2所示。结果表明, 改进遗传算法全局搜索能力强、收敛速度快, 可准确地找到多极值函数的全局最优值。

表2 测试结果

	模拟退火算法	普通遗传算法	改进遗传算法
测试次数	1 000	1 000	1 000
全局收敛 (%)	2	77.8	99
平均时间/s	0.30	0.25	0.2

基于改进遗传算法的风电机组模型参数辨识

1. 参数辨识方案

本文提出一种基于改进遗传算法 (IGA) 的

双馈风电机组模型关键参数辨识方案, 如图5所示。求取实际系统和模型系统在同一激励下产生的实测输出 Y_m 与仿真输出 Y_s 的误差 J , 经遗传算法计算后, 去修正模型参数, 反复进行, 直至误差 J 为最小。其中, 风机模型的搭建及并网仿真在Digsilent/Power Factory软件中实现, 遗传算法的编写在Matlab环境下实现, 通过软件接口实现两种软件的数据交换, 完成参数寻优。

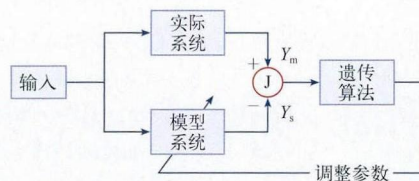


图5 基于IGA的双馈风电机组模型参数辨识方案

辨识中所用的激励为风机稳态运行时并网点突然发生三相接地短路, 导致并网点电压跌落至0.2 pu, 故障持续时间为0.625 s。由于考核的是风机从故障前到故障后一个时间段内的并网特性, 因此误差的求取存在权重的划分问题。参考德国的模型验证标准TR4^[20], 本文中误差 J 的求取原则确定如下

$$J = J_p + J_q \quad (5)$$

$$J_p = 0.1\Delta P_1 + 0.6\Delta P_2 + 0.3\Delta P_3 \quad (6)$$

$$J_q = 0.1\Delta Q_1 + 0.6\Delta Q_2 + 0.3\Delta Q_3 \quad (7)$$

式中, J 为实测输出与仿真输出的总误差; J_p 、 J_q 分别为有功输出和无功输出的综合误差; ΔP_1 、 ΔP_2 和 ΔP_3 分别为实测系统与仿真系统的有功输出在故障前、故障中和故障恢复阶段的分段误差; ΔQ_1 、 ΔQ_2 和 ΔQ_3 分别为实测系统与仿真系统的无功输出在故障前、故障中和故障恢复阶段的分段误差。

辨识流程如图6所示。

2. 算例1: 参数辨识方案的有效性验证

将所搭风机模型的仿真结果作为实测输出, 对LVRT控制模块中PI控制器的参数进行辨识, 并将所得结果与原有参数进行比较, 检测所提参数辨识方案还原真实参数的能力。PI控制器的模型框图如图7所示 (参数描述见表1)。

辨识结果如表3所示。由表3可见, 该辨识方案可准确得出所要辨识的参数。

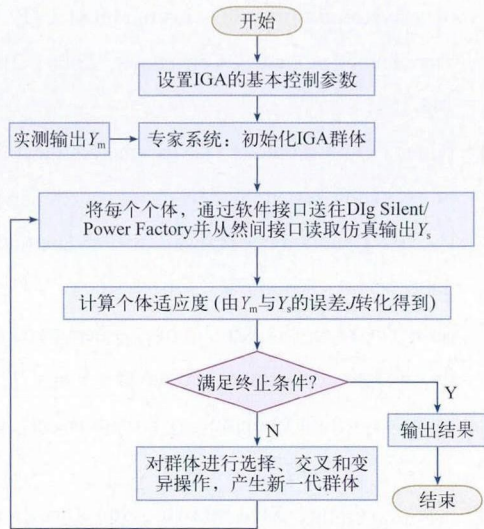


图6 基于IGA的双馈风电机组模型参数辨识流程图

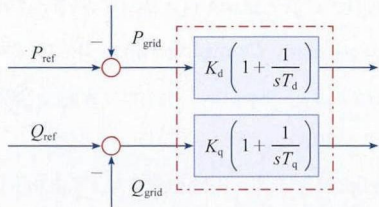


图7 LVRT控制模块中的P/Q控制器模型

表3 算例1辨识结果

参数名	原始参数	辨识结果
K_d	1	1.000 4≈1
T_d	1	1.000 3≈1
K_q	1	0.999 6≈1
T_q	1	0.999 7≈1

3. 算例2: 根据机组实测输出辨识模型关键参数

以某厂商实际风机在低电压穿越测试中的输出功率特性为验证目标, 对参数灵敏度分析所得的关键参数进行辨识。辨识结果如表4所示。

表4 实际系统参数辨识结果

模块	参数名	辨识结果
LVRT控制	K_d	0.925
LVRT控制	T_d	0.738
LVRT控制	K_q	0.925
LVRT控制	T_q	0.738
LVRT控制	T_limit	0.521
LVRT控制	I_limit	0.512
LVRT控制	T_climb	0.565
LVRT控制	K_climb	1.00
LVRT控制	K_ip	1.30

(续)

模块	参数名	辨识结果
LVRT控制	K_iq	1.96
转速控制	$Kptrq$	0.10
转速控制	$Kitrq$	0.01
转速控制	Tpc	5.02
保护模块	$CrowbarR$	1.20
保护模块	$CrowbarT$	0.08

由于本文所搭的双馈风电机组模型对某些模块进行了功能化处理, 因此模型中部分参数同实际风机的准确参数无法完全对应, 辨识结果的优劣可通过比较模型系统与实际风机在低电压穿越中的输出曲线来确定, 如图8所示。

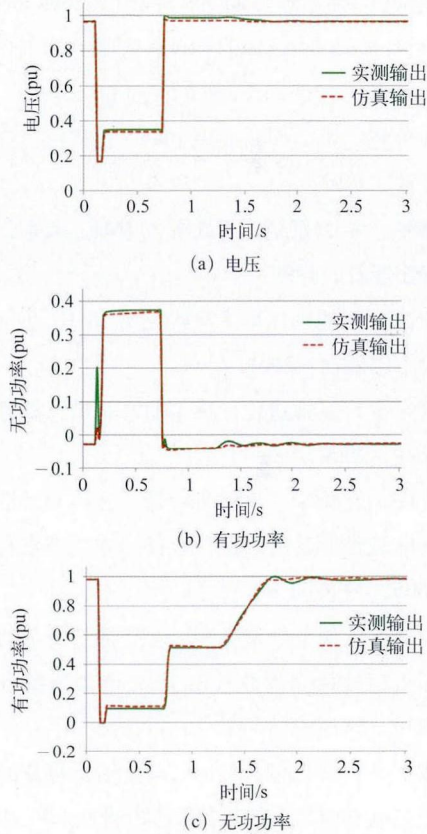


图8 实测输出与仿真输出比较

可见, 模型与实际风机的输出曲线已比较吻合, 辨识所得到的参数是准确的。

结束语

本文基于DIgSilent/Power Factory软件搭建了双馈感应式风力发电机组的仿真模型, 并通过参数灵敏度分析给出了双馈风电机组控制模型

中影响风机并网特性的关键参数,针对所得到的关键参数,提出一种基于改进遗传算法的辨识方案,将其应用于实际风机模型的参数辨识中。结果表明:提出的改进遗传算法全局搜索能力强,收敛速度快,可准确地找到多极值函数的全局最优点;所提参数辨识方案切实可行,经参数辨识后,模型可准确地反映实际风机在低电压穿越中的并网特性,并进一步用于大电网的机电暂态仿真中。

参考文献

- [1] Ellis A, Kazachkov Y, Muljadi E, et al. Description and Technical Specifications for Generic WTG Models-A Status Report [C]. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2011: 1-8.
- [2] 沈善德. 电力系统辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [3] 鞠平. 电力系统非线性辨识 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [4] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] 徐宗本. 模拟进化计算 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] 舒辉, 文劲宇, 罗春风, 等. 含有非线性环节的发电机励磁系统参数辨识 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (6): 66-70.
- [7] 高林, 夏俊荣, 戴义平. 基于遗传算法的联合循环机组建模和参数辨识 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34 (4): 34-37.
- [8] 戴义平, 邓仁纲, 刘炯. 基于遗传算法的汽轮机数字电液调节系统的参数辨识研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (7): 101-104.
- [9] Abdelhadi B, Benoudjit A, Nait-Said N. Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20 (2): 284-291.
- [10] Aliprantis D C, Sudhoff S D, Kuhn B T. Genetic algorithm-based parameter identification of a hysteretic brushless exciter model [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21 (1): 148-154.
- [11] Puma J Q, Colome D G. Parameters identification of excitation system models using genetic algorithms [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2008, 2 (3): 456-467.
- [12] Shiu Yin Yue, Chi Kin Chow. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13 (2): 454-472.
- [13] Yue-jiao Gong, Xiao-min Hu, Jun Zhang, et al. A linear map-based mutation scheme for real coded genetic algorithms [J]. 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation. 18-23 July 2010. Barcelona, Spain. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010. 1-7.
- [14] Vasconcelos J A, Ramirez J A, Takahashi R H C, et al. Improvements in genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37 (5): 3414-3417.
- [15] 弗拉基斯拉夫·阿赫玛托夫. 风力发电用感应发电机 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [16] 迟永宁. 大型风电场接入电网的稳定性问题研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [17] 李晶, 王伟胜, 宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 电网技术, 2003, 27 (9): 14-17.
- [18] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用及软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [19] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 等. 遗传算法及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1996.
- [20] FGW e. V. - Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien. 2010. Technical Guidelines for Power Generating Units, Part 4 - Demands on Modelling and Validating Simulation Models of the Electrical Characteristics of Power Generating Units and Systems, Revision 5. Kiel, German; s. n. , 22 March 2010.

(收稿日期: 2015-01-15) **EA**