

感应电机全功率风电场动态聚合建模与应用

林斌¹, 邵昊舒², 王霄鹤¹, 郦洪柯¹, 蔡旭²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 上海交通大学 风力发电研究中心, 上海 200240)

摘要:随着风电场规模的扩大,大型风电场逐渐由陆上向海上发展,占据海上风电场主流机型的鼠笼式感应电机(SCIG)成为研究海上风电场动态特性的主要研究对象。为了系统研究海上聚合风电场的动态特性,在保持风电场外部特性不变的聚合原则基础上,提出一种计及集电系统电缆电容聚合的海上鼠笼型感应电机风电场新型聚合算法,包括风力发电机组和集电系统内部参数的聚合算法。最后,以江苏某实际海上风电场为研究案例,在PSCAD仿真软件上建立具有34个鼠笼式感应风电机组的详细风电场模型以及相应的聚合模型,仿真并比较了两种模型在电网故障条件下PCC点的动态特性。结果表明,所提出的动态聚合方法能够准确反映风电场的动态特性,具有较高精确性。

关键词:风力发电;海上风电场;参数聚合;动态特性

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22710

Dynamic Aggregation Modeling and Application of Induction Generator Full-power Wind Farm

LIN Bin¹, SHAO Haoshu², WANG Xiaohu¹, LI Hongke¹, CAI Xu²

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, Zhejiang, China;

2. Wind Power Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increasing scale of wind farms, large scale wind farm is gradually shifting from onshore wind farm to offshore wind farm, squirrel cage induction generator (SCIG), which is the main type of offshore wind farm, has become the main research object of offshore wind farm dynamic characteristics. In order to study the dynamic characteristics of offshore wind farm, based on the aggregation principle of keeping wind farm external characteristics unchanged, a new aggregation algorithm of offshore SCIG wind farm considering the aggregation of cable capacitance of collection system was proposed, including the aggregation algorithm of wind turbine parameters and the collection system internal parameters. Finally, taking an actual offshore wind farm in Jiangsu province as a case study, a detailed wind farm model with 34 SCIGs and the corresponding aggregation model were established on PSCAD simulation software. The dynamic characteristics of the two models at the PCC points under grid fault conditions were compared. The results show that the proposed dynamic aggregation algorithm can reflect the dynamic characteristics of the wind farm with high accuracy.

Key words: wind power generation; offshore wind farm; parameter aggregation; dynamic characteristics

近些年,随着我国对于新能源行业重视程度的不断增加,风力发电占据我国电力系统中的比重呈现出明显的增加态势,使得电力系统中风电渗透率不断增加^[1]。与此同时,由于海上风力资源丰富,其能量效益比大于陆上风电,因此呈现

出明显的由陆上风电场发展为海上风电场的趋势。另一方面,由于风电具有随机性、间歇性等固有特点,随着大规模海上风电接入电网,将对于电力系统的稳定运行产生不利影响^[2],因此在风电场建设投产之前,有必要针对风电场进行系

基金项目:国家重点研发计划(2019YFE0104800);浙江省博士后科研择优资助项目(ZJ2020040);中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司基金项目:海上永磁和感应电机全功率风电场动态聚合建模

作者简介:林斌(1990—),男,硕士,Email:lin_b@ecidi.com

通讯作者:蔡旭(1964—),男,博士,教授,Email:xucai@sjtu.edu.cn

统全面的可行性分析,力求准确分析大规模海上风电场接入电力系统以后和电力系统之间的相互作用关系及其影响,尤其需要重点分析风电场接入电力系统之后在稳态运行以及暂态故障穿越过程中的动态特性^[3-4]。

目前风电机组以及风电场的建模和分析主要针对陆上风电机组,尤其以双馈风电机组^[5]以及永磁直驱风电机组为主,然而在海上风电场建

设过程中,感应电机全功率风电机组为主流机型,因此有必要针对海上感应电机全功率风电机组及其风电场的动态建模展开系统研究与分析,典型的海上感应电机全功率风电场的拓扑结构如图1所示,风电场低压母线一般接有1~12路馈线,而每一条馈线上则连接1~12台风电机组,升压变压器的高压侧母线则通过海底电缆连接至电网。

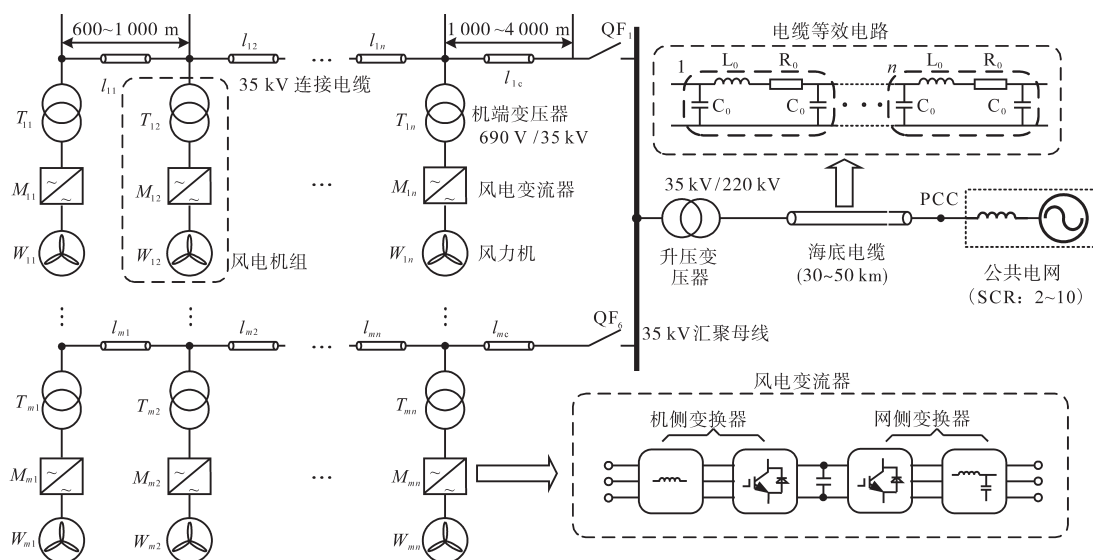


图1 鼠笼风电场结构图

Fig.1 Topological structure of SCIG wind farm

在针对海上风电场进行动态分析的工程实际中,通常将研究的主体从风电机组的单机上升到整个风电场的高度,重点讨论多台风电机组聚集组网之后对于电网的整个交互响应,建立一个能够反映该响应过程的风电场模型,这同时也是进行相关风电场稳定性分析的研究基础。在目前常规的风电场规划中,装机台数从数百台到数千台不等,不同风电机组之间的复杂的运行工况差异以及集电线路的影响,大大增加了风电场动态建模的难度,因此如果每台风电机组均采用精细化模型,将导致风电场模型以及软件仿真规模呈几何式的增长,庞大的运算量将直接降低仿真软件的计算效率,极端复杂情况下将无法计算,难以满足动态分析的要求^[6-7],因此在实际操作中往往采用风电场聚合模型,将整个风电场等效聚合为单台或者多台风电机组,在整个风电场外特性上实现和精细化模型的等效,保证聚合模型精度的前提下尽可能简化模型,提高计算效率,该方法也被称为风电场的单机聚合方法和多机聚合方法^[8-10]。

目前,陆上风电场的动态聚合模型研究已有了一些成果,然而和陆上风电场不同的是,海上风电机组的单机容量更大,并且采用电缆线路作为主要的集电线路,这将导致风电机组聚合模型的模态更加丰富^[11-12],风电场集电线路的动态特性也成为主要的聚合研究对象,不能够加以忽略。同时,和陆上风电场的架空线集电线路不同的是,海上风电场的电缆集电线路的充电电容很大,一般为架空线电路的20~25倍,相当于无功补偿设备被并联到了系统线路中,在这种情况下,常规聚合方式中忽略输电线电容的方式将带来极大误差,在聚合结果上也将和精细化模型之间产生显著差异^[13-15]。

本文针对大规模海上感应电机全功率风电机组及其风电场聚合算法开展研究,充分考虑到电缆电容对于聚合精度的影响,提出一种计及集电系统电缆电容聚合的海上鼠笼型感应电机(squirrel cage induction generator, SCIG)风电场新型聚合算法,并基于江苏某实际风电场案例分析,分析结果验证了所提新型风电场聚合方法

的有效性。

1 海上风电场聚合建模

1.1 风电场拓扑结构

本文将江苏某实际海上感应电机全功率风电场作为研究对象,如图1所示,该风电场中共有6条馈线,共计34台容量为4.5 MW的鼠笼感应发电机,每台感应发电机组通过一个背靠背全功率变流器连接至690 V/35 kV变压器,最终接入风电场中的35 kV馈线。风电场的升压变压器采用35 kV/230 kV变压器,其高压侧通过220 kV交流电缆并入公共电网,低压侧连接到35 kV馈线。

1.2 机组及风电场的运行与控制

变速恒频风电机组全风速范围内的工作区间可以根据控制方式以及运行方式的不同分为四个阶段,如图2所示,其中横坐标为风速 v ,纵坐标为风电机组转速 ω_t ,四个阶段分别为I-低恒转速阶段、II-MPPT阶段、III-高恒转速阶段以及IV-恒功率阶段,相应的将全风况划分为四个区域,在 $[v_{cutin}, v_1]$ (I区)控制风电机组转速稳定为低恒转速 ω_{t_min} ,随后进入MPPT阶段,风电机组保持最佳叶尖速比 λ_{opt} 运行,风机转速同时保持最佳转速 ω_{t_opt} ,伴随风速增加,转速抵达额定值 ω_{t_max} ,在 $[v_2, v_n]$ 风速区间(III区)内保持额定高恒转速 ω_{t_max} 运行,直至机组功率超过额定功率,此时机组开始变桨(IV区),进入恒功率区。

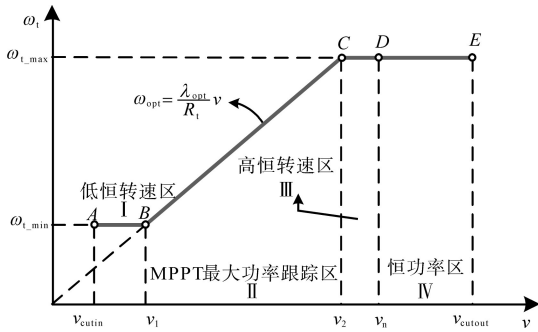


图2 全风况下的运行模式划分

Fig.2 Operation mode division under full wind condition

鼠笼感应电机风电机组的机侧变流器控制框图如图3所示,由两部分级联控制组成,有功外环或转速外环与 q 轴电流内环组成级联的有功控制环,转子磁链外环与 d 轴电流内环组成级联的磁链控制环。其中, P_{opt} 和 P_m 分别为机侧变流器最佳有功功率给定值和有功功率实际值, Ψ_r^* 和 Ψ_r 分别为转子磁链给定值和实际值, ω_r 为转子电气角频率, θ_r 为转子角度, i_{sabc} 为发电机输入电流, u_s

为变流器调制电压, i_{sd}^* 和 i_{sq}^* 分别为 d 轴和 q 轴电流的参考值,下标 d, q 代表 $d-q$ 坐标系下的变量;下标 α, β 代表 $\alpha-\beta$ 坐标系下的变量。

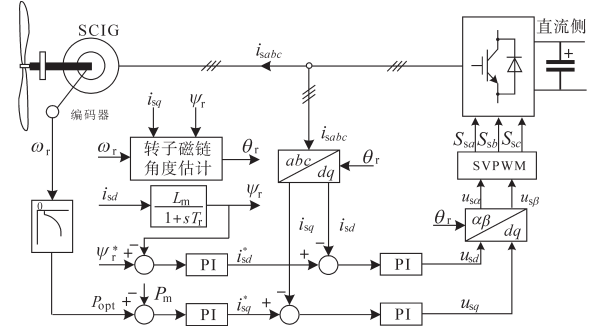


图3 机侧变换器控制框图

Fig.3 Control diagram of rotor side converter

网侧变流器通常采用基于电网电压定向的矢量控制策略,其控制框图如图4所示,在电网电压定向的矢量控制方式下,网侧变流器的有功功率以及无功功率能够实现解耦控制。网侧变流器输出的有功功率主要通过直流母线闭环进行调节,无功控制部分由无功外环和电流内环组成,通过修改无功指令可以使网侧变流器运行于单位功率因数或特定无功指令下。其中, u_{dc} 和 u_{dc}^* 分别为直流母线电压实际值和参考值, Q_g 和 Q_g^* 分别为无功功率实际值和参考值, i_d^* 和 i_q^* 分别为 d 轴和 q 轴电流的参考值, L 为变流器等效电感, i_{abc} 为变流器输出电流, u_{abc} 为公共耦合点(point of common coupling, PCC)电压, u_{gabc} 为变流器调制电压, θ_g 为锁相环输出角度, ω 为电网额定角频率。

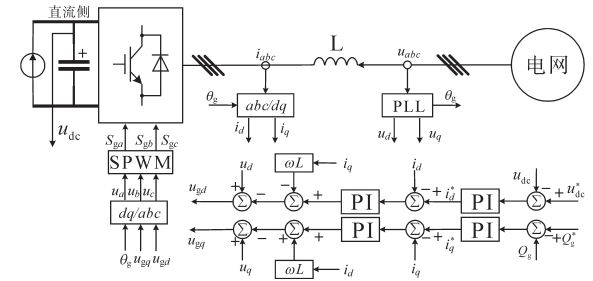


图4 网侧变换器控制框图

Fig.4 Control diagram of grid side converter

在大规模风电场的场级控制层面,由于电力系统的有功出力和系统负荷之间需要保持实时平衡,因此风电场稳态有功功率控制多采用分层控制的方式,上级电网根据优化调度对风电场下达有功功率的指令,风电场在满足上级调度指令的同时需要将指令分解并下发至风电场内每一台风电机组。风电场的无功电压控制与有功功率的控制类似,采用分层分级的指令控制方式,

上层风电场群接受上级调度指令,交由下层风电机组闭环实时控制,并同时配合装设的无功补偿设备进行风电场电压调节。

2 海上风电场聚合建模

2.1 参数聚合原则与风电机组参数聚合算法

本文重点关注单机聚合以及多机聚合之后线路参数以及聚合风机参数的快速计算方法,风电场聚合建模遵循的原则如下:

1) 风电场聚合模型的并网点电压与详细模型的并网点电压相等。

2) 风电场聚合模型中发电机组装机容量为详细模型中各个风力发电机组装机容量之和。

3) 风电场聚合模型的输出有功功率以及无功功率与详细模型输出有功功率以及无功功率相等。

利用上述假设,风电场单机聚合建模中,假定 m 台同型号的风力发电机聚合成为1台机组,则聚合后的发电机参数为

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{eq} = \sum_{i=1}^m S_i = mS \\ P_{eq} = \sum_{i=1}^m P_i = mP \\ Q_{eq} = \sum_{i=1}^m Q_i = mQ \\ r_{s-eq} = \frac{r_s}{m} \\ r_{r-eq} = \frac{r_r}{m} \\ x_{m-eq} = \frac{x_m}{m} \\ x_{s-eq} = \frac{x_s}{m} \\ x_{r-eq} = \frac{x_r}{m} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: S 为发电机容量; m 为风电机组台数;下标eq表示等效, x_m 为发电机励磁电抗; x_s, x_r 分别为发电机定子电抗和转子电抗; r_s, r_r 分别为发电机定子电阻和转子电阻。

在风电场多机聚合中,首先需要针对风电场中的风电机组进行分群,目前常用的分群的指标为风电机组所处环境的风速,本文采用该指标作为风电场多机聚合分群的指标依据,根据风电机组运行工况的不同设定分群指标判据,对同群的风电机组聚合成一台风电机组,从而得到由多台

风电机组表征的风电场等值模型。

2.2 输入风速等效聚合算法

当不考虑尾流效应时,则等值风电机组的风速与单机风速相同,可表示为

$$v_{eq} = v \quad (2)$$

如考虑风电场内部的风机输入风速的差异,首先通过风速和风速功率曲线得出每台风电机组的功率,然后求取其平均功率,最后通过风速功率曲线反推得出等效风速。等效前第 k 台风电机组的输出功率 P_k 为

$$P_k = f(v_k) \quad (3)$$

式中: f 为风速功率曲线的拟合函数; v_k 为风速,等效风速可由下式计算得出:

$$v_{eq} = f^{-1} \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(v_i) \right] \quad (4)$$

采用单机法时,如风场每台机组的风速不完全相同时,则等效风速为

$$v_{eq} = \sqrt[3]{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i^3} \quad (5)$$

则聚合模型捕获的机械功率为

$$P_m = m \left(\frac{1}{2} \rho A C_{pmax} v_{eq}^3 \right) \quad (6)$$

2.3 集电系统等效聚合算法

风电场集电系统等效聚合的原则,需要保证线路聚合前后电阻上消耗的有功保持一致、电感上消耗的无功保持一致,同时需要考虑电缆电容对于聚合精度的影响,保证线路聚合前后电容上吸收的无功保持一致。

以风电场每条馈线上的链式电路为例,由于馈线内部每一点的电压均不相同,因此馈线末端第 n 条电缆线上的阻抗功率损耗可以表示为

$$\Delta S_n = (S_n - j \frac{1}{2} C_n U_n^2)^2 Z_n / U_n^2 \quad (7)$$

其次,馈线上第 m 条电缆线的阻抗功率损耗 ΔS_m 可以表示为

$$\Delta S_m = \frac{\left(\sum_{i=m}^{n-1} (S_i - j \frac{1}{2} (C_{i+1} + C_i) U_i^2 + \Delta S_{i+1}) - j \frac{1}{2} C_n U_n^2 \right)^2 Z_m}{U_m^2} \quad (8)$$

式中: S_i, U_i 分别为馈线上第 i 个风电机组的输出功率和端电压; C_i, Z_i 分别为馈线上第 i 个电缆线路的电容和阻抗; U_i 为馈线上第 i 个电缆线路的节点电压。

馈线上所有电缆的阻抗功率损耗 ΔS_{total} 可以

表示为

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \cdots + \Delta S_n \quad (9)$$

同样的,等效电路上的等效阻抗功率损耗 ΔS_{zeq} 可以表示为

$$\Delta S_{\text{zeq}} = (S_{\text{eq}} - j\frac{1}{2}C_{\text{eq}}U_{\text{eq}}^2)^2 Z_{\text{eq}} / U_{\text{eq}}^2 \quad (10)$$

由此,等效阻抗 Z_{eq} 可以表示为

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\Delta S_{\text{total}}}{(S_{\text{eq}} - j\frac{1}{2}C_{\text{eq}}U_{\text{eq}}^2)^2} U_{\text{eq}}^2 \quad (11)$$

其中等效电路的等效端电压可以表示为

$$U_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i S_i}{S_{\text{eq}}} \quad (12)$$

根据在电缆线路等效前和等效后电容器上消耗的无功功率相等的原理,考虑内部电压特性的等效电容 C_{eq} 可以表示为

$$C_{\text{eq}} = (C_n U_n^2 + C_{n-1} U_{n-1}^2 + C_{n-2} U_{n-2}^2 + \cdots + C_2 U_2^2 + C_1 U_1^2) / (U_{\text{eq}}^2 + U_1^2) \quad (13)$$

3 案例分析

3.1 仿真结果对比

以江苏某海上风电场为实际案例,在PSCAD仿真软件中建立了风电场的详细模型、单机聚合模型以及多机聚合模型,横向比较了各种模型在PCC点的输出参数情况,对比参数主要包括输出有功功率、输出无功功率和输出电流。

根据先前的分析,如果有风电机组在额定风速以上运行,则风电场需要至少两台单机聚合模型来表示。基于此,先不讨论风速大于额定风速的情况,假设部分机组风速分别为4 m/s, 8 m/s, 10 m/s 情况下,分别对详细风场模型、单机聚合模型和多机聚合模型进行仿真对比,三相对称短路故障发生在10 s处,跌落幅度达到额定电压的20%,仿真结果如图5所示,分别对比电网故障情况下三种模型PCC电压有效值、输出有功功率,输出无功功率和输出电流有效值情况,可以看出,在三种工作条件下,多机聚合模型比单机聚合模型具有更高的精度,可以更好地反映详细模型在暂态过程中的动态响应。若考虑桨距角动作对于系统聚合精度的影响,假设部分机组风速分别为4 m/s, 8 m/s, 10 m/s 以及触发变桨控制的12 m/s,三相对称短路故障发生在10 s处,跌落幅度同样达到额定电压的

20%,聚合模型与详细模型的对比结果如图6所示。可以看出,在上述四种工作条件下,多机聚合模型和详细模型在稳态下具有高度的一致性。尽管动态过程存在偏差,但聚合模型可以反映详细模型的动态响应。

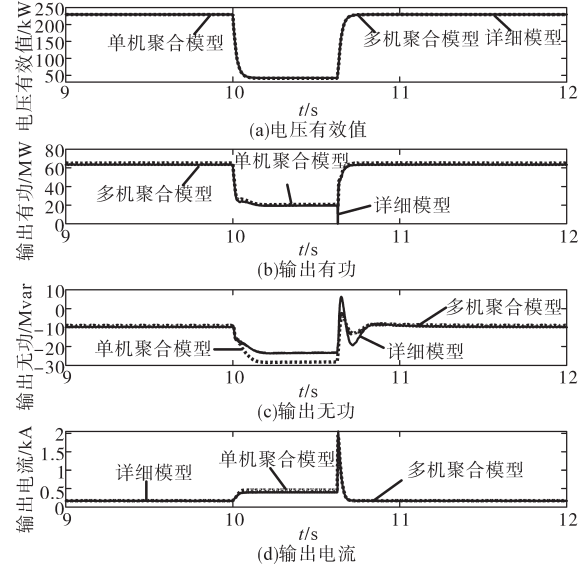


图5 三种运行工况下风电场并网点输出对比图

Fig.5 Output comparison curves under three working conditions at PCC

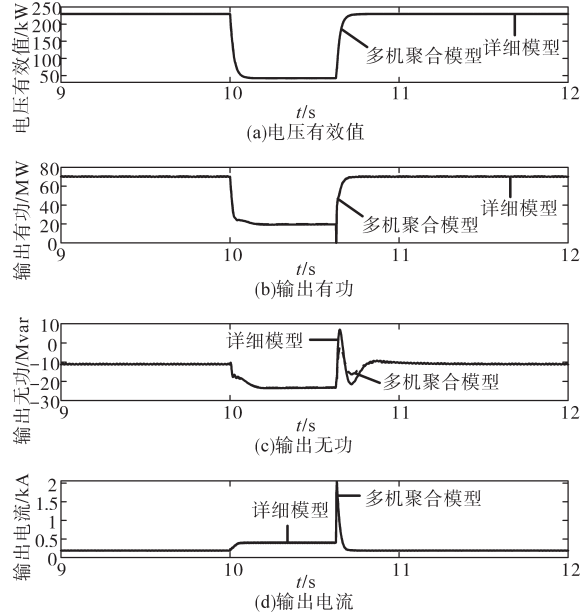


图6 四种运行工况下风电场并网点输出对比图

Fig.6 Output comparison curves under four working conditions at PCC

为了验证接地电容对于聚合精度的影响,假设每台风电机组的输入风速均相同,分别对考虑和不考虑集电线路接地电容的聚合模型进行了建模和对比,仿真结果如图7所示。可以看出,考虑接地电容的聚合模型的仿真具有更高

的精度。

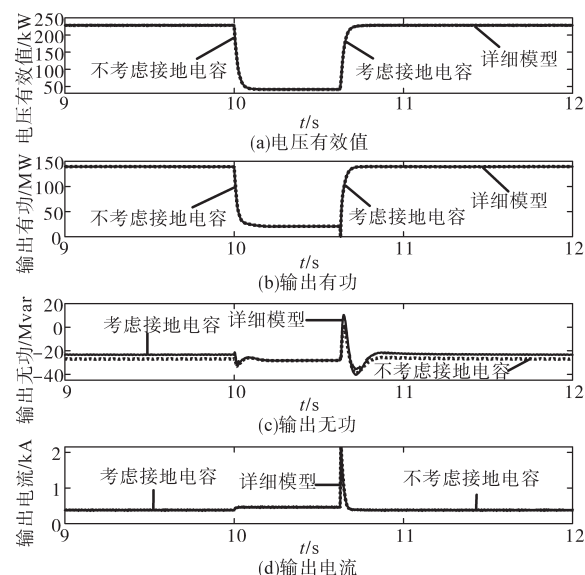


图7 接地电容对于聚合结果影响对比图

Fig.7 Comparison diagram of the influence of grounding capacitance on aggregation results

3.2 聚合模型误差与对比分析

从图5~图7中可以发现,尽管聚合模型的响应趋势与详细模型一致,但是仍然存在误差。因此,需要分别对故障前后的稳态情况进行定量分析,采用的误差分析指标如下:

$$E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(X_{eqi} - X_i)}{X_N} \times 100\% \quad (14)$$

式中: X 为对比的参数; n 为采样点数;下标eq表示聚合模型等效参数;下标N表示额定值。

表1给出了单机和多机聚合模型的误差,多机聚合模型相比单机聚合模型具有更小的误差和更高的准确性。在低压穿越过程中,单机聚合模型的故障前后参数误差相差较大,多机聚合模型的故障前后误差均保持不变。另外,从电压幅值不同的角度来看,单机聚合模型的等效阻抗表示精度相比多机聚合模型来说更低。

表1 单机聚合模型和多机聚合模型与详细模型的误差对比

Tab.1 Error comparison of single-machine aggregation model and multi-machine aggregation model and detailed model

聚合方式	故障前误差			
	电压/ %	有功/ %	无功/ %	电流/ %
单机聚合	0.084 7	1.08	0.480	0.82
多机聚合	0.064 1	0.18	0.043	0.14
聚合方式	故障中误差			
	电压/ %	有功/ %	无功/ %	电流/ %
单机聚合	0.320 0	0.79	3.170 0	12.03
多机聚合	0.085 1	0.18	0.096 4	0.17

由于海上风电场通常采用电缆作为系统集电线路,其充电电容是架空线电容的20~25倍,集电线路充电电容对于聚合精度的影响如表2所示。考虑接地电容的聚合模型比不考虑接地电容的聚合模型具有更高的精度,特别是对于输出无功功率,在集电线路保留接地导纳支路的情况下,输出无功稳态精度提高2.334 7%。仿真结果证明了本文所提的集电线路聚合方法对于提升聚合精度的有效性。

表2 考虑和不考虑电缆电容聚合模型与详细模型的误差对比
Tab.2 Error comparison of aggregation model and detailed model with and without the consideration of cable capacitance

聚合方式	故障前误差			
	电压/ %	有功/ %	无功/ %	电流/ %
不考虑电缆电容	0.086 5	0.1	2.380 0	0.380
考虑电缆电容	0.028 2	0.1	0.045 3	0.088
聚合精度提升	0.058 3	0.0	2.334 7	0.292
聚合方式	故障中误差			
	电压/ %	有功/ %	无功/ %	电流/ %
不考虑电缆电容	0.021 90	0.11	0.070 5	0.47
考虑电缆电容	0.008 42	0.10	0.026 2	0.23
聚合精度提升	0.013 48	0.01	0.044 3	0.24

4 结论

本文针对感应电机全功率变换机组的风电场聚合建模问题展开研究与分析,提出一种计及集电系统电缆电容聚合的海上鼠笼型感应电机风电场新型聚合算法,并以江苏某实际海上风电场为实际案例,验证了所提参数聚合算法的有效性,相关结论总结如下:

1) 聚合模型可以反映包含不同工况风电机组的风电场动态特性。

2) 考虑到各个风电机组输入风速不同的影响,多机聚合模型能更好地反映风电场的动态特性。

3) 对于海上风电场的聚合模型,必须保留集电线路的接地电容。在集电线路保留接地导纳支路的情况下,输出无功稳态精度提高2.334 7%。

参考文献

- [1] 迟永宁,梁伟,张占奎,等.大规模海上风电输电与并网关键技术综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3758-3770.

Chi Yongning, Liang Wei, Zhang Zhankui, et al. An overview

- on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758–3770.
- [2] Le H T, Santoso S. Analysis of voltage stability and optimal wind power penetration limits for a non-radial network with an energy storage system[C]//Power Engineering Society General Meeting (PES), 2007, 14(3): 1–8.
- [3] 蔡旭, 李征. 风电机组与风电场的动态建模[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Cai Xu, Li Zheng. Dynamic modeling of wind turbines and wind farms[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [4] Yousefian R, Bhattarai R, Kamalasdan S. Transient stability enhancement of power grid with integrated wide-area control of wind farms and synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4818–4831.
- [5] Ruan J Y, Lu Z X, Qiao Y, *et al.* Analysis on applicability problems of the aggregation-based representation of wind farms considering DFigs' LVRT behaviors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 1–13.
- [6] Sanchez A G, Molina M G, Lede A M R. Dynamic model of wind energy conversion systems with PMSG-based variable-speed wind turbines for power system studies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(13): 10064–10069.
- [7] Ding N, Lu Z, Qiao Y, *et al.* Simplified equivalent models of large-scale wind power and their application on small-signal stability[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2013, 1(1): 58–64.
- [8] 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.
- [9] Wang P, Zhang Z, Huang Q, *et al.* Improved wind farm aggregated modeling method for large-scale power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6332–6342.
- [10] Mercado-Vargas M J, Gomez-Lorente D, Rabaza O, *et al.* Aggregated models of permanent magnet synchronous generators wind farms[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 1287–1298.
- [11] Conroy J, Watson R. Aggregate modeling 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.
- [12] 陈钊, 夏安俊, 汪宁渤, 等. 适用于低电压穿越仿真的风电场内集电线路等值方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 51–56.
- Chen Zhao, Xia Anjun, Wang Ningbo, *et al.* Collector network equivalent method of wind farm for low voltage ride through simulation[J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(8): 51–56.
- [13] Teng W, Wang X, Meng Y, *et al.* An improved support vector clustering approach to dynamic aggregation of large wind farms[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 215–223.
- [14] 古庭赞, 杨骐嘉, 林呈辉, 等. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 102–111.
- Gu Tingyun, Yang Qijia, Lin Chenghui, *et al.* A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102–111.
- [15] Du W, Dong W, Wang H, *et al.* Dynamic aggregation of same wind turbine generators in parallel connection for studying oscillation stability of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4694–4705.

收稿日期: 2020–11–22

修改稿日期: 2020–12–22