

风电接入对继电保护的影响(二) ——双馈式风电场电磁暂态等值建模研究

张保会¹, 李光辉¹, 王 进¹, 郝治国¹, 张金华¹, 黄仁谋², 王小立^{1,3}

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 海南电网公司, 海南 海口 570100;

3. 宁夏电力公司调度中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 提出建立双馈式感应发电机(DFIG)风电场多机等值方案。考虑到 DFIG 风机短路故障条件下投入转子 Crowbar 保护后, 短路电流与转子实时转速相关的特点, 提出以短路故障前瞬间的风机转子转速值作为 DFIG 风机分群的指标, 以准则函数 E 收敛后得到的值最小为分群标准, 采用 K -means 算法将具有相近指标的机组分到同一机群中。针对单个机群中可能存在多种型号 DFIG 风机的情况, 采用基于容量加权的参数聚合方法, 计算等值风电机组转子运动方程参数、阻抗参数、变流器及其控制环节参数和箱式变压器参数。在 PSCAD/EMTDC 平台上建立 DFIG 风电场详细模型及其等值模型, 仿真结果表明在相同故障条件下, 风电场等值模型的故障电流能够很好地拟合详细模型。

关键词: DFIG; 风电场; 模型; 电磁暂态等值; 继电保护; 短路电流; 风电

中图分类号: TM 614; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.001

0 引言

随着风力发电技术的大力发展, 风电机组类型已经从早期的失速型定桨距机组发展到配合变桨距系统变速恒频机组, 如双馈式感应发电机(DFIG)风电机组。由于 DFIG 机组包含有电力电子元件, 需要微秒级的数值积分步长才能不失真地仿真其快速动态的电磁暂态过程, 其需要的数值积分运算量相当巨大, 采用 PSCAD/EMTDC 等离线软件仿真其电磁暂态过程, 耗时多, 几乎难以完成。因此难以计算多个大型风电场的详细电磁暂态数值仿真模型。电力系统实时仿真工具 RTDS 针对电力电子元件开发出小步长计算的 PB5(或 GPC)卡, 但每块 PB5(或 GPC)卡最多胜任一台 DFIG 机组的电磁暂态计算, 硬件规模的限制使得在 RTDS 平台上进行千万千瓦风电接入后的电磁暂态过程的实时数值仿真并不现实。

对于 DFIG 风电场等值问题, 文献[1]建立了用单台风机表征的适用于计算稳态潮流的风电场等值模型。文献[2-3]建立用于系统暂态稳定性分析的风电场单机等值模型, 在此基础上, 文献[4-5]采用风速或者桨距角作为 DFIG 风机群的划分指标, 建立多机机电暂态等值方案。大规模风力发电的投入同样对依据电压、电流波形特征的继电保护和控制装置的动作行为带来了不可忽视的影响[6-7], 分析这种影响的基础是电磁暂态过程的数值仿真, 而仅考虑潮

流计算与机电暂态等因素的等值模型难以满足电磁暂态过程研究的需要, 必须在全面考察变速恒频式风机、风电场故障特征的基础上, 才能有效地分析风电场接入对继电保护的影响。

在确保 DFIG 风机模型有效性的基础上^[8], 本文研究了 DFIG 风电场电磁暂态等值的目标及实现方案, 参考同步发电机的同调等值方案, 提出基于转速分群的 DFIG 风电场多机等值方案, 采用 K -means 算法来实现机组的分群过程。采用基于机组容量加权的参数聚合方法计算等值风电机组参数; 在 PSCAD/EMTDC 软件平台上验证了等值方案的有效性。

1 DFIG 风电场电磁暂态等值的主要思想

本文所研究的内容属于风电场电磁暂态等值, 主要用于研究大规模风电场并网对系统继电保护影响, 因此不仅要求稳态和故障时等值模型与详细模型输出的功率一致, 还要求等值前后具有一致的电压、电流波形信息。电磁暂态过程持续时间短, 关注的是影响继电保护动作时间窗内秒级的故障电气量。

文献[8-10]中指出, DFIG 风电机组的故障电流不仅与故障电压跌落水平有关, 还与风机故障前的工作状态及风机本身的参数有着紧密的联系, 同属于一个大型风电场的风机的工作状态也可能存在巨大差异, 本文提出了以具有相似故障电磁暂态信息作为 DFIG 风机的分群原则, 对各机群进行参数聚合得到对应的等值机组, 最终建立多机等值的模型。

通过对 DFIG 风机的电磁暂态过程的研究, DFIG 转子转速比风力机俘获的有效风速更能反映机组的当前工作状态, 原因在于: 一是电磁暂态过程

收稿日期: 2012-10-29; 修回日期: 2012-12-07

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012-AA050201)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2012AA-050201)

持续的时间短,而风力机的动态响应惯性时间常数大,利用转速而非风速更适合电磁暂态过程分析;二是考虑到文献[8]的研究结论,投入 Crowbar 后,DFIG 风机故障电流与转子当前的转速相关。由于 Crowbar 保护在故障后 2~5 ms 就快速投入,投入前不同的稳态功率解耦控制规律导致暂态电压、电流变化过程极其复杂,且这段时间保护来不及动作,因此本文并不刻意追求该时间段内的等值效果,仅考虑在 Crowbar 投入后、故障切除前这一时间段内的等值问题。

不难得出将转速作为划分机群的指标。如果将 DFIG 风机转速相同或者相近的风机划分到一个机群,这样一个风电场就可以划分成若干个机群,并分别求取各个机群的等值模型,实现利用多个等值机来描述风电场的电磁暂态过程,以此达到等值的目的。

参照同步发电机的同调等值方案,DFIG 风机群电磁暂态等值步骤如下:

- a. 划分内部系统与外部系统,内部系统指风电场的接入网络,外部系统为待等值的 DFIG 风电场;
- b. 以 DFIG 风机转速为指标划分等值机群;
- c. 合并同群 DFIG 风机母线;
- d. 简化外部网络;
- e. 对同群的 DFIG 风机进行动态参数聚合,得到等值风机的参数。

2 DFIG 机群划分

本文的等值机群根据 DFIG 风机转速信息来进行划分,尽量使同一等值机群里的风机故障电流波形的主要特征一致。由于 DFIG 风机的转速跨度较大,约为 0.7~1.3 p.u.,因此在实际情况中,很少有风机能够严格满足转速相等的条件。实用等值机群的划分方法是用 2 个 DFIG 风机转速之差在研究时间内的最大值来反映其转速的相同程度,当这个最大值小于某个给定的门槛值 ε 时,则可以将它们归到同一机群里,此时划分等值机群的指标如式(1)所示。

$$\max |\omega_i(t) - \omega_j(t)| < \varepsilon \quad (1)$$

由于电磁暂态等值所关注的时间段较短,风机的转速在这一时间段的变化比较小,因此可以用故障之前的初始转速来替代式(1)中随时间变化的转速。具体判据如式(2)所示。

$$|\omega_i(0) - \omega_j(0)| < \varepsilon \quad (2)$$

风电场控制中心能实时监控风电场内部所有风机的转速,可以将某一时刻所有风机的转速提取出来,然后经过一定的算法,将风机分成数个机群。为了提高等值的精度,在分群时,尽量使单个机群内大多数风机的转速分布在转速区间的中心。建议单个等值机群中风机转速变化上下限之差 $\varepsilon \leq 0.05$ p.u.,减小 ε 可进一步提高等值的精度。

本文采用 K -means 算法^[9]实现 DFIG 风电场机组分群过程。该算法是以准则函数 E 收敛后得到的值最小为分类标准,达到将 N 个数据样本分成 K 个类的目的。并使每个类中的所有样本具有比较高的相似程度,而类与类之间数据样本相似程度比较低。

现将使用 K -means 算法^[11]对 DFIG 风电场机组分群的计算步骤简述如下。

- a. 从风电场控制中心提取全部 DFIG 风机转速的 N 个数据样本,估计需要分成的机群数目 K ,并任取 K 个机组的转速样本作为初始聚类中心。
- b. 分别计算每个 DFIG 风机的转速与各聚类中心的距离,并将该 DFIG 风机归类到距离其最近的聚类中心所在机群中。
- c. 计算当前每个机群的 DFIG 风机的转速平均值 a_i 与准则函数 E :

$$a_i = \frac{1}{N_i} \sum_{\xi \in g_i} \xi, \quad E = \sum_{i=1}^K \sum_{\xi \in g_i} |\xi - a_i|^2 \quad (3)$$

其中, a_i 为第 i 个机群中 DFIG 风机转速的平均值; g_i 为第 i 个机群中所有 DFIG 风机的转速集合; ξ 为 g_i 中的转速样本; N_i 为第 i 个机群中机组的总数; E 为准则函数。

- d. 用 a_i 替代原来聚类中心,执行步骤 b—d 直到 E 收敛。

- e. 若计算出的任意一个机群内机组的转速均不满足式(2),则增大机群数目 K ,重复执行步骤 b—d。

3 DFIG 风机参数聚合

DFIG 风机机群分类后,需按类进行详细模型参数聚合。本文采用基于机组容量加权的参数聚合法计算 DFIG 等值风机的参数,可用于工程实际^[12-13]。

将同一个等值机群等值为一台 DFIG 风电机组,在进行参数聚合时假定如下:

- a. 被等值的 DFIG 机群接在同一条等值母线上;
- b. DFIG 等值机输入的机械功率及电磁功率与被等值的 DFIG 风机详细模型中各值之和相等;
- c. 同一等值机群里的 DFIG 风机转速相同。

DFIG 机群详细模型的参数聚合问题可以分成 4 个环节进行,分别是 DFIG 风机转子运动方程、DFIG 风机阻抗参数、包含控制器的变流器整流逆变环节以及箱式变压器单元。

分别对上述 4 个环节进行参数聚合就能得到 DFIG 风机群的等值模型。假设按照基于转速分群的原则,通过 K -means 算法得到待等值的某群风机 $M = \{1, 2, 3, \dots, n\}$,其额定容量 $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ 。则等值 DFIG 风机的容量为这 n 台风机的容量之和,同时按照假设条件等值机输入的机械功率及其电磁功率与详细模型中各值之和相等,则有:

$$S_e = \sum_{i=1}^n S_i, P_{e\epsilon} = \sum_{i=1}^n P_{ei}, P_{me} = \sum_{i=1}^n P_{mi} \quad \forall i \in M \quad (4)$$

其中, S 为风机的容量; P_e 为风机的电磁功率; P_m 为风机输入的机械功率; 下标 e 代表等值 DFIG 风机; 下标 i 为 DFIG 风机编号。

3.1 转子运动方程参数聚合

在待等值的风机群 M 中, 假设第 i 台 DFIG 风机转子运动方程为:

$$J_i \dot{\omega}_i = T_{mi} - T_{ei} - D_i(\omega_i - 1) \quad \forall i \in M \quad (5)$$

其中, J 为风机转子转动惯量; ω 为风机转子转速; T_m 为风机输入的机械功率; T_e 为风机的电磁功率; D 为阻尼系数; 下标 i 为 DFIG 风机编号。

式(5)中各值均为以自身额定容量 S_i 为基值的标么值。为得到等值 DFIG 风机的转子运动方程, 需转换到以 S_e 为基值的标么值系统, 则式(5)可转化为:

$$\frac{S_i}{S_e} J_i \dot{\omega}_i = \frac{S_i}{S_e} [T_{mi} - T_{ei} - D_i(\omega_i - 1)] \quad (6)$$

在求等值机群时减小 ϵ 的取值, 前述待等值的机群中所有机组的转速一致的假设条件显然是成立的, 并设所有机组的转速均为 ω , 将待等值的机群中的 n 台风机的转子运动方程相加得到:

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S_e} J_i \right) \dot{\omega} = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_e} [T_{mi} - T_{ei} - D_i(\omega - 1)] \quad (7)$$

设经参数聚合得到的等值 DFIG 风机与详细模型中风机的转子运动方程具有相同的表达形式, 以 S_e 为基值的方程为:

$$J_e \dot{\omega}_e = T_{me} - T_{ee} - D_e(\omega_e - 1) \quad (8)$$

比较式(7)和式(8)可以得到等值 DFIG 风机的转子转动惯量和阻尼系数分别见式(9)和式(10)。

$$J_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S_e} J_i \right) = \sum_{i=1}^n (\rho_i J_i) \quad (9)$$

$$D_e = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S_e} D_i \right) = \sum_{i=1}^n (\rho_i D_i) \quad (10)$$

其中, ρ_i 为编号为 i 的 DFIG 的导纳参数在等值机中所占比重。

可见, 聚合后等值 DFIG 风机的转子转动惯量、阻尼系数在等值机群标么值系统下, 是以 S_i 与 S_e 的比值为权重的加权平均值。值得注意的是, 电磁转矩和机械转矩在详细模型与等值模型中, 其有名值并未变化。当 n 台机组型号一致时, 等值前后转子转动惯量与阻尼系数在各自容量下的标么值不变。

3.2 等值电机阻抗参数聚合

假设待等值的 n 台 DFIG 风机都并联在同一母线上, 所有机组采用 T 型等效电路, 将 n 台机组的 T 型等效电路并联, 简化成 1 台机组的等效电路, 以此来求得等效模型的参数。DFIG T 型等效电路见图 1。

采用基于容量加权的聚合算法计算 DFIG 等值

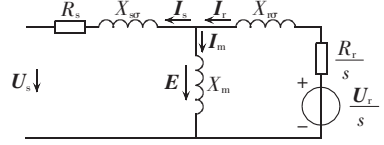


图 1 DFIG 的 T 型等效电路

Fig.1 T-type equivalent circuit of DFIG

风机阻抗参数, 其求解方程如下:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{se} + jX_{se}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{R_{si} + jX_{si}} \\ \frac{1}{R_{re}/s + jX_{re}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{R_{ri}/s + jX_{ri}} \\ \frac{1}{X_{me}} = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{X_{mi}} \end{cases} \quad (11)$$

其中, X_{se} 、 X_{re} 、 R_{se} 、 R_{re} 、 X_{me} 分别为等值 DFIG 风机以额定容量 S_e 为基值的定/转子电抗、电阻, 以及等效互抗的标么值; X_{si} 、 X_{ri} 、 R_{si} 、 R_{ri} 、 X_{mi} 分别为第 i 台 DFIG 风机以各自额定容量 S_i 为基值的定/转子电抗、电阻, 以及等效互抗的标么值; s_i 、 s_e 为第 i 台 DFIG 风机以及等值机的相对滑差。

假设所有 DFIG 风机的相对滑差 $s=1$ (转子堵转状态), 可得等值 DFIG 机组的相关聚合阻抗参数:

$$\begin{aligned} X_{se} &= \frac{b_s}{a_s^2 + b_s^2}, \quad R_{se} = \frac{a_s}{a_s^2 + b_s^2} \\ X_{re} &= \frac{b_r}{a_r^2 + b_r^2}, \quad R_{re} = \frac{a_r}{a_r^2 + b_r^2} \\ a_s &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2}, \quad b_s = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \\ a_r &= \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i R_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2}, \quad b_r = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i X_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2} \end{aligned} \quad (12)$$

等效互抗:

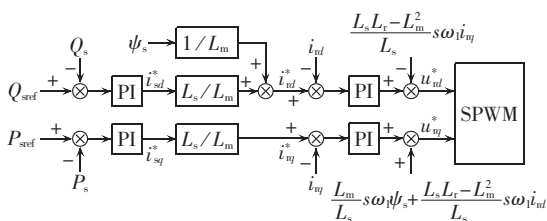
$$X_{me} = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{X_{mi}} \quad (13)$$

特别地, 当 n 台机组型号一致时, 等值前后 DFIG 风机的阻抗参数以各自容量为基值的标么值不变。

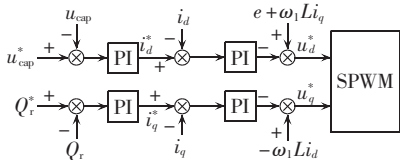
3.3 变流器及其控制环节参数聚合

DFIG 风机使用包含转子侧变流器与网侧变流器组成的 PWM 整流器组进行交流励磁。其控制环节如图 2 所示, 图中 e 为电网电压, ω_1 为同步旋转角速度, L 为网侧变流器与电网间的电感值。

转子侧变流器采用定子磁场定向控制, 功率外环的有功功率参考 P_{ref} 由最优功率追踪模块给定, 无功功率参考 Q_{ref} 用以满足机组并网功率因数标准, 两者与实际测量功率的偏差经速度较慢的 PI 控制器调节, 得到转子电流参考 i_{rd}^* 和 i_{rq}^* ; 内环电流参考与实际测量电流 i_{rd} 和 i_{rq} 的偏差经快速 PI 控制器调节后得到转子侧变流器 SPWM 的参考信号。电网侧变流器采用电网电压定向实现双通道双闭环控制, 功率外环的有功通道用以稳定直流母线电压, 参考值为 u_{cap}^* , 无功参考 Q_r^* 用以维持机组功率因数, 两



(a) DFIG 风机机侧变流器控制框图



(b) DFIG 风机网侧变流器控制框图

图 2 DFIG 风机交流励磁变流器组控制框图

Fig.2 Control diagram of AC excitation converters of DFIG-based wind generator

者与实际测量值的偏差经 PI 控制器调节,得到网侧变流器电流参考 i_{gd}^* 和 i_{gq}^* ;内环电流参考与实际测量电流 i_{gd} 和 i_{gq} 的偏差经 PI 控制器调节后得到电网侧变流器 SPWM 的参考信号^[14-15]。

等值前后模型中的控制模块均采用标么值系统,详细模型中以 S_i 为基值,等值机中以 S_e 为基值。控制环节中的 PI 控制器参数按照基于容量加权参数聚合的思想,按式(14)计算:

$$C_e = \left(\sum_{i=1}^n S_i C_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n S_i \right) = \sum_{i=1}^n \rho_i C_i \quad (14)$$

其中, C 可以指代 PI 控制器中比例积分环节各参数。

变流器中开关管的阻抗值及平波电抗的阻值均可仿照式(11)和式(12)进行处理。

对于现场运行的 DFIG 风机,转子侧 Crowbar 保护电路在外部短路故障后 2~5 ms 内投入,直到故障消失后才会退出,该时段电气量信息数据窗是影响电力系统继电保护装置动作行为的主要因素。而这段时间内 DFIG 风机转子侧变流器被闭锁,稳态的功率解耦控制规律失去控制效果;同时由于该时段内转子侧变流器闭锁使其没有功率流动,交流励磁变流器组有功功率实时平衡的控制规律使得网侧变流器没有有功功率输出,在目前主流的单位功率因数控制策略下,网侧变流器输出的电流几乎为零。因此变流器及其功率解耦控制环节的参数对于 DFIG 风机电磁暂态过程中电压、电流的波形并无太大影响。

3.4 箱式变压器参数聚合

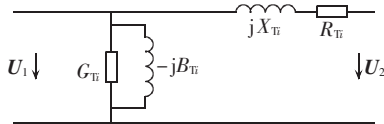
箱式变压器中待聚合的参数包括容量以及阻抗值。按照前面的等值思想,等值变压器容量取详细模型中所有箱式变压器容量之和:

$$S_{Te} = \sum_{i=1}^n S_{Ti} \quad (15)$$

其中, S_{Te} 为等值变压器容量; S_{Ti} 为第 i 台变压器容量。

在 PSCAD/EMTDC 软件平台上变压器统一采

用如图 3 所示的 Γ 型简化等效电路。图中 G_{Ti} 、 B_{Ti} 、 X_{Ti} 和 R_{Ti} 分别为第 i 台变压器电导、电纳、高低压绕组的总电抗和高低压绕组的总电阻,均为以自身容量为基值的标么值。等值变压器的参数求取方法类似于 DFIG 等值机阻抗参数的求取方法。

图 3 变压器 Γ 型简化等效电路图Fig.3 Γ -type simplified equivalent circuit of transformer

特别地,当 n 台变压器的型号一致时,等值前后变压器的阻抗参数以各自容量为基值的标么值不变。

4 等值方案验证

本文仅在 PSCAD/EMTDC 中建立包含 10 台双馈式机组的小型风电场模型,其结构图见图 4。为简化起见,暂不考虑风电场内部的汇流线路的阻抗。

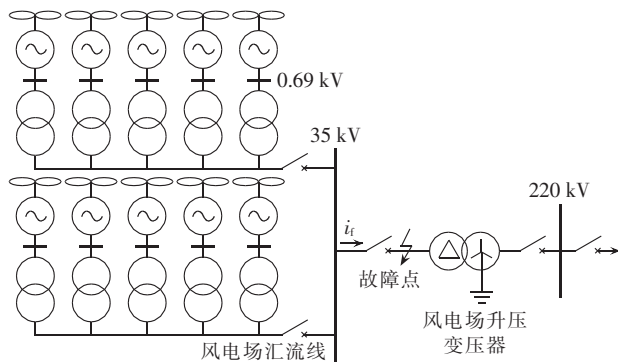


图 4 风电场布局

Fig.4 Layout of wind farm

通常同一风电场内部 DFIG 风机的型号相同,但也有可能包含 2~3 种型号。本文在此考虑 2 种情况:一是风电场内 10 台 DFIG 风机型号相同;二是风电场内 10 台 DFIG 风机分 2 种型号,每种各 5 台。

4.1 风机型号相同

假设风电场内 10 台 DFIG 风机型号相同,采用德国最大的电机制造商 VEM 公司提供的某种 DFIG 电机参数,具体参数值如下: $S_e = 1.632 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $P_e = 1.55 \text{ MW}$, $f_e = 50 \text{ Hz}$, $U_e = 0.69 \text{ kV}$, $X_m = 5.8959 \text{ p.u.}$, $R_s = 0.0090838 \text{ p.u.}$, $X_{\sigma} = 0.18167 \text{ p.u.}$, $R_r = 0.009015 \text{ p.u.}$, $X_{\sigma r} = 0.143969 \text{ p.u.}$, $J = 1.5 \text{ p.u.}$ 。风机箱式变压器及风电场出口升压变压器参数如下:风机箱式变压器, $S_e = 1.6 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $X_l = 6.0\% \text{ p.u.}$, $R_l = 1.0\% \text{ p.u.}$, $G_l = 1.0\% \text{ p.u.}$;风电场升压变压器, $S_e = 20 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $X_l = 8.0\% \text{ p.u.}$, $R_l = 0.5\% \text{ p.u.}$, $G_l = 0 \text{ p.u.}$ 。

根据表 1 中的转速(标么值,后同)信息,利用 K-means 算法将风电场内的 DFIG 机组分成 2 个机群,得到的分群结果如表 2 所示,易知第 I 群风机

最大转速差为 0.05 p.u.,第Ⅱ群风机最大转速差为 0.048 p.u.,式(2)中 ε 取 0.05 p.u.,满足分群要求。

表 1 短路初始时刻各机组的转速值
Tab.1 Initial speed of DFIG-based wind generators after short circuit fault

机组编号	转速	机组编号	转速
1	0.948	2	0.906
3	0.974	4	0.919
5	0.998	6	0.930
7	0.984	8	0.962
9	0.892	10	0.882

表 2 K-means 算法分群结果
Tab.2 Result of classification by K-means algorithm

分群号	风机编号
I	1、3、5、7、8
II	2、4、6、9、10

由于风机型号相同,按上述介绍的等值机参数聚合方法,得到等值机组的标么值参数与单台机组的相同。为了检验等值结果,在风电场出口的升压变压器低压侧施加三相对称故障,检验等值模型和详细模型的拟合程度。故障开始时间为 2.996 s,Crowbar 在 3 s 时投入。图 5 和图 6 分别为在三相与 BC 两相故障情况下详细模型与等值模型故障电流对比。

由上述仿真结果可知,对于同样的故障条件与机组参数,不同工作条件下的 DFIG 风机故障电流的

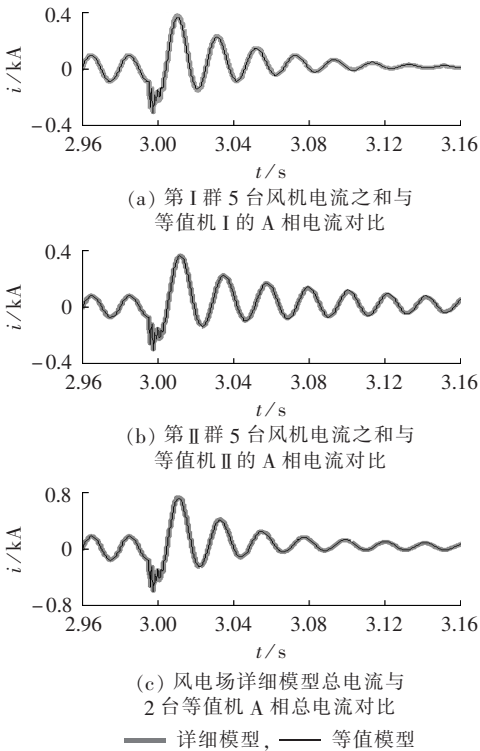


图 5 风电场详细模型与其等值模型三相短路故障电流对比

Fig.5 Comparison of three-phase short circuit current between detailed model and its equivalent model

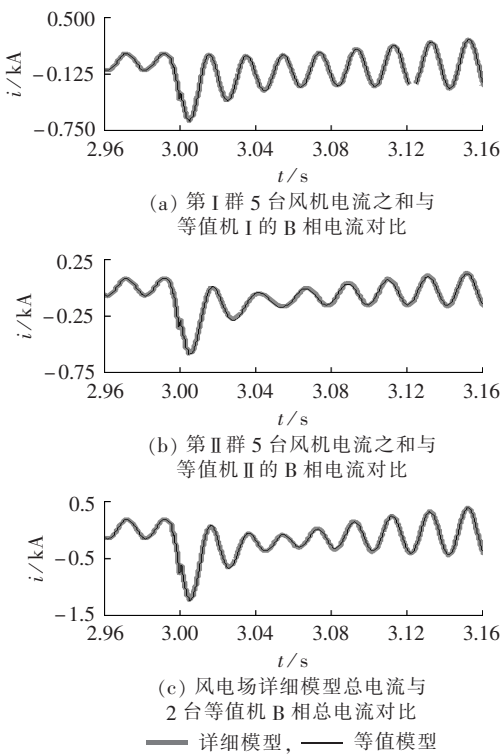


图 6 风电场详细模型与其等值模型 BC 两相故障电流对比

Fig.6 Comparison of BC-phase short circuit fault current between detailed model and its equivalent model

幅值与频率均不相同。等值模型能够在电磁暂态的时间尺度上很好地拟合详细模型,完全能满足用于测试、分析风电场并网对系统电磁暂态的影响。

需要说明的是,上面用于测试的 10 台风机转速相差很小,而在实际情况中,同一风电场内 DFIG 风机的转速可能相差很大,这就需要分更多的群,建立更多的等值机。同群的机组越多,等值所节省的数值仿真计算量越大,等值效果越明显。

4.2 风机型号不同

假设风电场内 10 台 DFIG 风机分成 2 种型号,每种各 5 台,编号 1~5 的 DFIG 电机的具体参数值如 4.1 节所述。编号 6~10 的电机采用国内湘电集团提供的某型号的 DFIG 电机参数,具体参数值如下: $S_e=2.105\text{ MV}\cdot\text{A}$, $P_e=2.0\text{ MW}$, $f_e=50\text{ Hz}$, $U_e=0.69\text{ kV}$, $X_m=6.10137\text{ p.u.}$, $R_s=0.010969\text{ p.u.}$, $X_{sr}=0.08124\text{ p.u.}$, $R_r=0.010626\text{ p.u.}$, $X_{rw}=0.126487\text{ p.u.}$, $J=1.6\text{ p.u.}$ 。

由于电磁暂态持续过程短暂,可假设此过程中风速不变,机组的桨距角调节装置时间常数大,还来不及动作。在短路初始时刻各机组的转速值见表 3。根据表 3,用 K-means 算法将风电场内的 DFIG 机组分成 2 个机群,得到的分群结果如表 4 所示。

由于采用 2 种型号的风机,按上述基于容量加权的等值机参数聚合方法,得到 2 台等值机参数如下:等值机 I, $S_e=9.106\text{ MV}\cdot\text{A}$, $P_e=8.65\text{ MW}$, $f_e=50\text{ Hz}$,

表 3 短路初始时刻各机组的转速值

Tab.3 Initial speed of DFIG-based wind generators after short circuit fault

机组编号	转速	机组编号	转速
1	1.020	2	1.068
3	1.034	4	1.125
5	1.086	6	1.058
7	1.044	8	1.113
9	1.100	10	1.135

表 4 K-means 算法分群结果

Tab.4 Result of classification by K-means algorithm

分群号	风机编号
I	1、2、3、6、7
II	4、5、8、9、10

$U_e=0.69$ kV, $X_m=5.989148$ p.u., $R_s=0.012231$ p.u., $X_{s0}=0.115787$ p.u., $R_r=0.009904$ p.u., $X_{r0}=0.135337$ p.u., $J=1.546233$ p.u.; 等值机 II, $S_e=9.5790$ MV·A, $P_e=9.1$ MW, $f_e=50$ Hz, $U_e=0.69$ kV, $X_m=6.029767$ p.u., $R_s=0.011910$ p.u., $X_{s0}=0.100205$ p.u., $R_r=0.010202$ p.u., $X_{r0}=0.131959$ p.u., $J=1.565925$ p.u.。

为检验等值结果,在风电场出口升压变压器低压侧施加三相对称故障,故障开始时间为 2.996 s, Crowbar 在 3 s 时投入。图 7 和图 8 分别为在三相与 BC 两相故障情况下详细模型与等值模型故障电流对比。

由上述仿真结果可知,在风电场内包含 2 种型

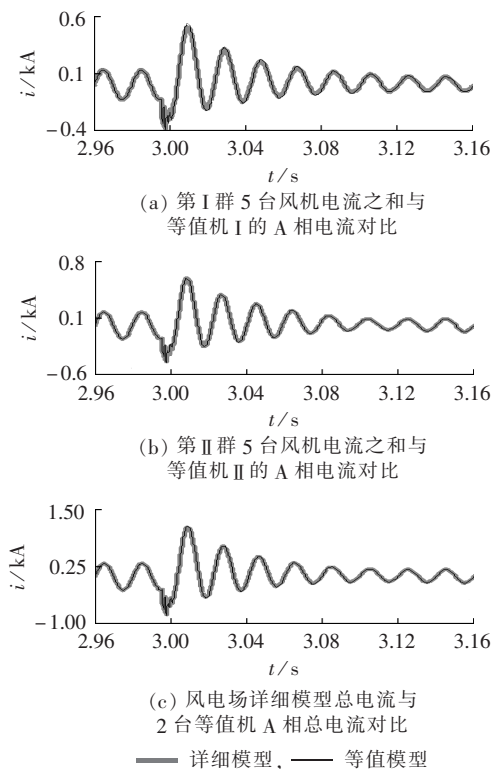


图 7 风电场详细模型与其等值模型三相短路电流对比

Fig.7 Comparison of three-phase short circuit current between detailed model and its equivalent model

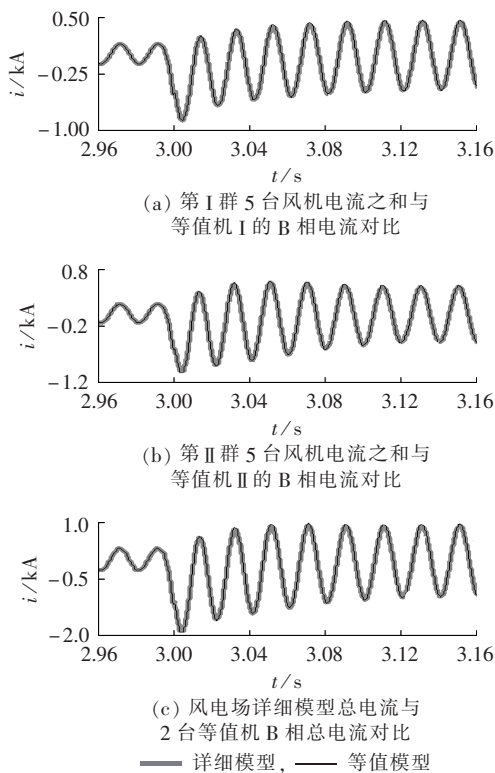


图 8 风电场详细模型与其等值模型 BC 两相短路电流对比

Fig.8 Comparison of BC-phase short circuit current between detailed model and its equivalent model

号 DFIG 风机的情况下,经 K-means 算法分群后,利用基于容量加权聚合法得到的 DFIG 风机等值模型能够在电磁暂态的时间尺度上很好地拟合详细模型,完全能满足用于测试、分析风电场并网对系统电磁暂态特征与继电保护的影响。

5 结语

提出了采用 DFIG 风机转速信息作为划分等值机群的指标,确保同群机组有相似的故障电流特征。给出 DFIG 风机基于故障前转速信息的实用表达式,采用 K-means 分类算法实现对风电场内风机的分群。针对同一个风电场内可能含有多种型号的 DFIG 风机的情况,采用基于容量加权的聚合算法计算 DFIG 等值机的相关参数,过程简单,适用于工程实际。在 EMTDC/PSCAD 软件平台上建立风电场及其等值模型,对比两者在相同故障条件下的仿真结果,验证了等值方案的有效性。

参考文献:

- [1] STANKOVIC A M, SARIC A T. Transient power system analysis with measurement-based gray box and hybrid dynamic equivalents[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1): 455-462.
- [2] AKHMATOV V. An aggregated model of a large wind-farm with

- variable-speed wind turbines equipped with doubly-fed induction generators[J]. Wind Engineering, 2004, 28(4): 479-488.
- [3] SHAFIU A, ANAYA-LARA O, BATHURST G. Aggregated wind turbine models for power system dynamic studies[J]. Wind Engineering, 2006, 30(3): 171-186.
- [4] FERNANDEZ L M, JURADO F, SAENZ J R. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines[J]. Renewable Energy, 2008, 33(1): 129-140.
- [5] 苏勋文. 风电场动态等值建模方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
- SU Xunwen. Research on dynamic equivalent modeling of wind farms[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010.
- [6] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-7.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 1-7.
- [7] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [8] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
- ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.
- [9] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 19-21.
- [10] 马志云. 电机瞬态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 121-130.
- [11] 赖玉霞, 刘建平. K-means 算法的初始聚类中心的优化[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(10): 147-149.
- LAI Yuxia, LIU Jianping. Optimization study on initial center of K-means algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(10): 147-149.
- [12] 何孝军. 电力系统动态等值中同调机群聚类方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- HE Xiaojun. A clustering method for coherent generator groups in dynamic equivalents of power system[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [13] 胡杰, 余贻鑫. 电力系统动态等值参数聚合的实用方法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 26-31.
- HU Jie, YU Yixin. A practical method of parameter aggregation for power system dynamic equivalence[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 26-31.
- [14] 舒进, 张保会, 李鹏, 等. 变速恒频风电机组运行控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 89-93, 97.
- SHU Jin, ZHANG Baohui, LI Peng, et al. A control strategy on the variable-speed constant-frequency wind turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 89-93, 97.
- [15] 孙国霞, 李啸驰, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-73.
- SUN Guoxia, LI Xiaocong, CAI Yiming. Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10): 69-73.

作者简介:

张保会(1953-), 男, 河北魏县人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);

李光辉(1986-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事风力发电及其对继电保护影响的研究(E-mail: gofeilee@gmail.com)。

Impact of wind farm integration on relay protection(2): DFIG-based wind farm electromagnetic transient equivalent model

ZHANG Baohui¹, LI Guanghui¹, WANG Jin¹, HAO Zhiguo¹, ZHANG Jinhua¹,
HUANG Renmou², WANG Xiaoli^{1,3}

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Hainan Power Grid Corporation, Haikou 570100, China;

3. Dispatch Center of Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: A multi-machine equivalence scheme is proposed for the electromagnetic transient numerical simulation of large-scale DFIG-based wind farm. Since the short circuit current is related to the real-time rotor speed after the rotor Crowbar protection is put into operation during the short circuit fault of DFIG-based wind generator, it is proposed that, the rotor speed just before the short circuit fault is taken as the classification index of DFIG-based wind generators. With the minimum value of the criterion function E after convergence as the criterion, the K -means clustering algorithm is applied to classify the generators with similar index. As there may be several types of DFIG-based wind generator in a group, the capacity-weighted aggregation is applied to calculate the parameters of the equivalent wind power generators, i.e. the parameters of rotor motion equation, impedance, converter and its controller, and box-type transformer. The detailed model of a DFIG-based wind farm and its equivalent model are established on PSCAD/EMTDC platform and the simulative results show that, under the same fault condition, the fault current of equivalent model fits well that of the detailed model.

Key words: DFIG; wind farms; models; electromagnetic transient equivalence; relay protection; short circuit currents; wind power