



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 104268316 B

(45) 授权公告日 2015. 07. 08

(21) 申请号 201410462920. 5

(22) 申请日 2014. 09. 11

(73) 专利权人 河海大学

地址 211100 江苏省南京市江宁开发区佛城西路 8 号

(72) 发明人 周海强 鞠平 朱洁

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 许方

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006. 01)

审查员 陈丽娜

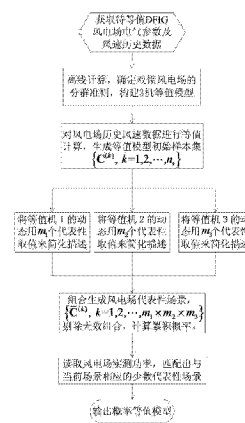
权利要求书5页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法,首先获取待等值DFIG风电场的电气参数及风速历史数据,然后进行以下步骤:通过离线计算,确定双馈风电场分群准则;对风电场风速历史数据进行等值计算,生成等值模型初始样本集;提取各类等值机的代表性参数取值,组合生成风电场各种代表性场景;根据风电场实测功率,匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景;应用双馈风电场概率等值模型,根据需要对系统进行分析计算。本发明弥补了现有双馈风电场等值建模方法仅考虑单个静态运行点,模型适应性差的缺陷;计算量大大减小,其模型具有较高精度,特别适用于大型双馈风电场的潮流及稳定性的统计特性的快速分析。



1. 一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 首先获取待等值 DFIG 风电场电气参数及风速历史数据, 其特征在于所述方法还包括以下步骤:

- (1) 通过离线计算、确定双馈风电场分群准则;
- (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算, 生成等值模型初始样本集;
- (3) 提取各类等值机的代表性参数取值, 组合生成风电场各种代表性场景;
- (4) 根据风电场实测功率, 匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景;
- (5) 应用双馈风电场概率等值模型, 根据需要对系统进行分析计算。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 其特征在于, 所述的步骤 (1) 通过离线计算、确定双馈风电场分群准则, 其过程是:

根据 DFIG 的注入风速及到 PCC 点的阻抗大小将风电场中 DFIG 分为 3 群, 分群方案根据 DFIG 的风速及到 PCC 点的阻抗所对应的点在参数平面上的位置决定, 当该点位于不同区域时, DFIG 分别呈现出三种不同的动态特性; 对给定风电场, 可通过离线数值计算具体确定参数平面各区之间的分界线。

3. 根据权利要求 1 所述的一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 其特征在于, 所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算, 生成等值模型初始样本集, 其过程是:

设风电场共有 n_s 组风速历史数据, 即 n_s 个场景, 对每个场景逐一进行分群等值计算; 将 DFIG 分为 3 群进行聚合; 以第 i 群为例, 其中, $i = 1, 2, 3$, 若 DFIG 机组型号相同, 则等值机与单台 DFIG 参数的标么值相等, 其中, 所述的标么值以发电机自身容量为基准容量; 等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和; 等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和, 再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ; 等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和;

将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{dfig} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源, 其中, X_s, X_r, X_m 分别为

DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗; 根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等值连接阻抗 Z_{equ_i} ; 定义 $C_i = [S_{\text{equ}_i} \ v_{\text{equ}_i} \ Z_{\text{equ}_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量, $C = [C_1 \ C_2 \ C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量, 则 $\{C_i^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集, 而 $\{C^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 其特征在于:

所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算, 生成等值模型初始样本集, 其过程是:

设风电场共有 n_s 组风速历史数据, 即 n_s 个场景, 对每个场景逐一进行分群等值计算; 将 DFIG 分为 3 群进行聚合; 以第 i 群为例, 其中, $i = 1, 2, 3$, 若 DFIG 机组型号相同, 则等值机与单台 DFIG 参数的标么值相等, 其中, 所述的标么值以发电机自身容量为基准容量; 等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和; 等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和, 再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ; 等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和;

将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{dfig} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源, 其中, X_s, X_r, X_m 分别为

DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗; 根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等值连接阻抗 Z_{equ_i} ; 定义 $C_i = [S_{equ_i} \ v_{equ_i} \ Z_{equ_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量, $C = [C_1 C_2 C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量, 则 $\{C_i^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集, 而 $\{C^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集;

所述的步骤 (3) 提取各类等值机的代表性参数取值, 组合生成风电场各种代表性场景, 其过程是:

第 i 群 DFIG 等值机的参数 C_i 取不同值时, 其中, $i = 1, 2, 3$, 风电场 PCC 点的无功功率及电压相差很小, 主要差别在于 PCC 点输出有功功率的幅值; 将第 i 群等值机输出功率的变化范围划分为 m_i 个子区间, 输出功率位于同一子区间的所有样本则用一个代表性参数 \bar{C}_i 来近似刻画;

在参数取 \bar{C}_i 时, DFIG 等值机输出功率与该子区间内所有样本输出功率的期望值之间偏差最小; 由此, 提取出第 i 群等值机的 m_i 个代表性参数 $\{\bar{C}_i^{(k)}, k = 1, \dots, m_i\}$, 用来近似描述第 i 群等值机各种可能的动态特性; 将风电场等值模型所含三类等值机的代表性取值进行组合, 共生成 $m_1 \times m_2 \times m_3$ 种代表性场景, 对应的代表性场景集为 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, m_1 \times m_2 \times m_3\}$; 去除其中一些不满足总容量不变原则的无效组合, 得出 n_r 个有效的代表性场景;

根据初始样本集统计出每一种代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的累积概率 p_k , 最终得到双馈风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$ 。

5. 根据权利要求 1 所述的一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 其特征在于:

所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算, 生成等值模型初始样本集, 其过程是:

设风电场共有 n_s 组风速历史数据, 即 n_s 个场景, 对每个场景逐一进行分群等值计算; 将 DFIG 分为 3 群进行聚合; 以第 i 群为例, 其中, $i = 1, 2, 3$, 若 DFIG 机组型号相同, 则等值机与单台 DFIG 参数的标么值相等, 其中, 所述的标么值以发电机自身容量为基准容量; 等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和; 等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和, 再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ; 等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和;

将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{dfig} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源, 其中, X_s, X_r, X_m 分别为

DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗; 根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等

值连接阻抗 Z_{equ_i} ; 定义 $C_i = [S_{\text{equ}_i} \quad v_{\text{equ}_i} \quad Z_{\text{equ}_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量, $C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量, 则 $\{C_i^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集, 而 $\{C^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集;

所述的步骤 (3) 提取各类等值机的代表性参数取值, 组合生成风电场各种代表性场景, 其过程是:

第 i 群 DFIG 等值机的参数 C_i 取不同值时, 其中, $i = 1, 2, 3$, 风电场 PCC 点的无功功率及电压相差很小, 主要差别在于 PCC 点输出有功功率的幅值; 将第 i 群等值机输出功率的变化范围划分为 m_i 个子区间, 输出功率位于同一子区间的所有样本则用一个代表性参数 \bar{C}_i 来近似刻画;

在参数取 \bar{C}_i 时, DFIG 等值机输出功率与该子区间内所有样本输出功率的期望值之间偏差最小; 由此, 提取出第 i 群等值机的 m_i 个代表性参数 $\{\bar{C}_i^{(k)}, k = 1, \dots, m_i\}$, 用来近似描述第 i 群等值机各种可能的动态特性; 将风电场等值模型所含三类等值机的代表性取值进行组合, 共生成 $m_1 \times m_2 \times m_3$ 种代表性场景, 对应的代表性场景集为 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, m_1 \times m_2 \times m_3\}$; 去除其中一些不满足总容量不变原则的无效组合, 得出 n_r 个有效的代表性场景;

根据初始样本集统计出每一种代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的累积概率 p_k , 最终得到双馈风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$;

所述的步骤 (4) 根据风电场实测功率, 匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景, 其过程是:

设现场实测风电场输出功率为 $P_{\text{PCC},m}$, 当前场景 C_{curr} 与代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配度为:

$$K_k = \begin{cases} \frac{p_k}{\sum_j p_j} \exp(-|P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(k)}|), & j \in \{|P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(j)}| \leq \varepsilon\} \\ 0, & \text{if } |P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(k)}| \geq \varepsilon, \quad k = 1, 2, \dots, n_r \end{cases}, \text{ 其中, } P_{\text{PCC}}^{(k)} \text{ 为风电场代}$$

表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 所对应的输出功率, 匹配度 K_k 是实测 $P_{\text{PCC},m}$ 及代表性场景输出功率之间偏差的逆指数函数, 并与代表性场景出现概率 p_k 成正比; 若两者偏差大于 ε , 则认为匹配度为零; ε 为预设值, 一般可取单台 DFIG 容量的 4-5 倍; 进一步对 K_k 进行归一化处理, 得出 C_{curr} 与 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配概率; 按照匹配概率大小排序, 得出与当前场景最为吻合的少数代表性场景。

6. 根据权利要求 1 所述的一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法, 其特征在于:

所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算, 生成等值模型初始样本集, 其过程是:

设风电场共有 n_s 组风速历史数据, 即 n_s 个场景, 对每个场景逐一进行分群等值计算; 将 DFIG 分为 3 群进行聚合; 以第 i 群为例, 其中, $i = 1, 2, 3$, 若 DFIG 机组型号相同, 则等值机与单台 DFIG 参数的标么值相等, 其中, 所述的标么值以发电机自身容量为基准容量; 等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和; 等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和, 再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ; 等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和;

将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{\text{dfig}} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源, 其中, X_s, X_r, X_m 分别为

DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗; 根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等值连接阻抗 Z_{equ_i} ; 定义 $C^i = [S_{\text{equ}_i} \ v_{\text{equ}_i} \ Z_{\text{equ}_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量, $C = [C_1 \ C_2 \ C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量, 则 $\{C_i^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集, 而 $\{C^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集;

所述的步骤 (3) 提取各类等值机的代表性参数取值, 组合生成风电场各种代表性场景, 其过程是:

第 i 群 DFIG 等值机的参数 C_i 取不同值时, 其中, $i = 1, 2, 3$, 风电场 PCC 点的无功功率及电压相差很小, 主要差别在于 PCC 点输出有功功率的幅值; 将第 i 群等值机输出功率的变化范围划分为 m_i 个子区间, 输出功率位于同一子区间的所有样本则用一个代表性参数 \bar{C}_i 来近似刻画;

在参数取 \bar{C}_i 时, DFIG 等值机输出功率与该子区间内所有样本输出功率的期望值之间偏差最小; 由此, 提取出第 i 群等值机的 m_i 个代表性参数 $\{\bar{C}_i^{(k)}, k = 1, \dots, m_i\}$, 用来近似描述第 i 群等值机各种可能的动态特性; 将风电场等值模型所含三类等值机的代表性取值进行组合, 共生成 $m_1 \times m_2 \times m_3$ 种代表性场景, 对应的代表性场景集为 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, m_1 \times m_2 \times m_3\}$; 去除其中一些不满足总容量不变原则的无效组合, 得出 n_r 个有效的代表性场景;

根据初始样本集统计出每一种代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的累积概率 p_k , 最终得到双馈风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$;

所述的步骤 (4) 根据风电场实测功率, 匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景, 其过程是:

设现场实测风电场输出功率为 $P_{\text{PCC},m}$, 当前场景 C_{curr} 与代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配度为:

$$K_k = \begin{cases} \frac{p_k}{\sum_j p_j} \exp(-|P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(k)}|), & j \in \left\{ |P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(j)}| \leq \varepsilon \right\} \\ 0, & \text{if } |P_{\text{PCC},m} - P_{\text{PCC}}^{(k)}| \geq \varepsilon, \quad k = 1, 2, \dots, n_r \end{cases}, \text{ 其中, } P_{\text{PCC}}^{(k)} \text{ 为风电场}$$

代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 所对应的输出功率, 匹配度 K_k 是实测 $P_{PCC, m}$ 及代表性场景输出功率之间偏差的逆指数函数, 并与代表性场景出现概率 p_k 成正比; 若两者偏差大于 ε , 则认为匹配度为零; ε 为预设值, 一般可取单台 DFIG 容量的 4-5 倍; 进一步对 K_k 进行归一化处理, 得出 C_{curr} 与 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配概率; 按照匹配概率大小排序, 得出与当前场景最为吻合的少数代表性场景;

所述的步骤 (5) 应用双馈风电场概率等值模型, 根据需要对系统进行分析计算, 其过程是:

根据风电场代表性场景 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$ 及其概率分布, 计算风电系统的概率潮流; 利用实时信息匹配出的少数代表性场景, 分析系统机电振荡的概率稳定性, 开展快速地在在线分析。

基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法

技术领域

[0001] 本发明属于电网技术领域,涉及风电场动态等值技术方法,特别是一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法。

背景技术

[0002] 随着风力发电技术的快速发展,双馈感应风力发电机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)由于其较好的技术及经济性能,得到了广泛应用。DFIG的动力学模型复杂,而且由于其单机容量相对较小,大型风电基地的装机总量往往高达上千台。其并网风电场会对系统功角及电压稳定性造成重要影响,因此需要进行详细分析。为降低系统阶数,提高分析计算速度,需要对双馈风电场进行动态等值处理,然后应用等值模型对系统进行稳定分析。风电场在实际运行时,风速具有随机性,风电场的运行场景不断迁移,其静态运行点不断变化,因此风电场等值模型也具有随机性。以10机风电场为例,若每台机风速可能取值为10个,则风电场的可能场景数将达到100亿(10^{10})。现有技术的双馈风电场建模方法具有以下缺陷:1、等值计算是基于某一静态运行点进行的,无法实现动态等值处理。如:中国专利CN201210087133.8公开的基于机械及电气动态特性的变速双馈风电场分群等值方法,即是针对特定风速下的风电场等值建模进行的。2、对于多场景问题的分析,常用的方法:1)蒙特卡洛方法:通过随机抽样产生大量样本,再逐个进行分析计算,并对计算结果进行统计分析。计算量太大,对于大型风电场而言,难以实施。2)结合半不变量与Gram-Charlier级数展开式求取联合概率分布密度函数的方法,其分析精度较低。

发明内容

[0003] 本发明的目的在于克服现有技术的不足之处,提供一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法,该方法能够实现多场景动态等值处理,计算量减少,精度较高,模型适应性强,而且便于实施。

[0004] 本发明解决所述技术问题所采用的技术方案是:一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法,首先获取待等值DFIG风电场电气参数及风速历史数据,其特征在于所述方法还包括以下步骤:

[0005] (1) 通过离线计算、确定双馈风电场分群准则;

[0006] (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算,生成等值模型初始样本集;

[0007] (3) 提取各类等值机的代表性参数取值,组合生成风电场各种代表性场景;

[0008] (4) 根据风电场实测功率,匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景;

[0009] (5) 应用双馈风电场概率等值模型,根据需要对系统进行分析计算。

[0010] 所述的步骤(1)通过离线计算、确定双馈风电场分群准则,其过程是:

[0011] 根据DFIG的注入风速及到公共接入点(the Point of Common Coupling, PCC)的阻抗大小将风电场中DFIG分为3群,分群方案根据DFIG的风速及到PCC点的阻抗所对应的点在参数平面上的位置决定,当该点位于不同区域时,DFIG分别呈现出三种不同的动态

特性；对给定风电场，可通过离线数值计算具体确定参数平面各区之间的分界线。

[0012] 所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算，生成等值模型初始样本集，其过程是：

[0013] 设风电场共有 n_s 组风速历史数据，即 n_s 个场景，对每个场景逐一进行分群等值计算；将 DFIG 分为 3 群进行聚合；以第 i ($i = 1, 2, 3$) 群为例，若 DFIG 机组型号相同，则等值机与单台 DFIG 参数的标么值（以发电机自身容量为基准容量）相等，等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和；等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和，再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ；等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和；

[0014] 将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{\text{dfig}} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源，其中， X_s , X_r , X_m 分别

为 DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗。根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等值连接阻抗 Z_{equ_i} ；定义 $C_i = [S_{\text{equ}_i} \ v_{\text{equ}_i} \ Z_{\text{equ}_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量， $C = [C_1 \ C_2 \ C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量，则 $\{C_i^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集，而 $\{C^{(k)}, k = 1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集。

[0015] 所述的步骤 (3) 提取各类等值机的代表性参数取值，组合生成风电场各种代表性场景，其过程是：

[0016] 第 i ($i = 1, 2, 3$) 群 DFIG 等值机的参数 C_i 取不同值时，风电场 PCC 点的无功功率及电压相差很小，主要差别在于 PCC 点输出有功功率的幅值；将第 i 群等值机输出功率的变化范围划分为 m_i 个子区间，输出功率位于同一子区间的所有样本则用一个代表性参数 \bar{C}_i 来近似刻画；

[0017] 在参数取 \bar{C}_i 时，DFIG 等值机输出功率与该子区间内所有样本输出功率的期望值之间偏差最小；由此，提取出第 i 群等值机的 m_i 个代表性参数 $\{\bar{C}_i^{(k)}, k = 1, \dots, m_i\}$ ，用来近似描述第 i 群等值机各种可能的动态特性；将风电场等值模型所含三类等值机的代表性取值进行组合，共生成 $m_1 \times m_2 \times m_3$ 种代表性场景，对应的代表性场景集为 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, m_1 \times m_2 \times m_3\}$ ；去除其中一些不满足总容量不变原则的无效组合，得出 n_r 个有效的代表性场景；

[0018] 根据初始样本集统计出每一种代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的累积概率 p_k ，最终得到双馈风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$ 。

[0019] 所述的步骤 (4) 根据风电场实测功率，匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景，其过程是：

[0020] 设现场实测风电场输出功率为 $P_{\text{PCC}, m}$ ，当前场景 C_{curr} 与代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配度

$$\text{为: } K_k = \begin{cases} \frac{p_k}{\sum_j p_j} \exp(-|P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(k)}|), & j \in \{|P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(j)}| \leq \varepsilon\} \\ 0, & \text{if } |P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(k)}| \geq \varepsilon, \quad k = 1, 2, \dots, n_r \end{cases} \quad \text{其中, } P_{PCC}^{(k)} \text{ 为风电场}$$

代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 所对应的输出功率; 匹配度 K_k 是实测 $P_{PCC,m}$ 及代表性场景输出功率之间偏差的逆指数函数, 并与代表性场景出现概率 p_k 成正比; 若两者偏差大于 ε , 则认为匹配度为零; ε 为预设值, 一般可取单台 DFIG 容量的 4-5 倍; 进一步对 K_k 进行归一化处理, 得出 C_{curr} 与 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配概率; 按照匹配概率大小排序, 得出与当前场景最为吻合的少数代表性场景。

[0021] 所述的步骤 (5) 应用双馈风电场概率等值模型, 根据需要对系统进行分析计算, 其过程是:

[0022] 根据风电场代表性场景 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, n_r\}$ 及其概率分布, 计算风电系统的概率潮流; 利用实时信息匹配出的少数代表性场景, 分析系统机电振荡的概率稳定性, 开展快速地在在线分析。

[0023] 本发明包括以下优点和有益效果:

[0024] 1、本发明通过对各类等值机参数统计规律的分析, 以少数代表性场景及其概率分布近似描述双馈风电场大量场景的动态特性及其统计规律, 弥补了现有双馈风电场等值方法仅考虑单个静态运行点, 模型适应性差的缺陷;

[0025] 2. 本发明根据历史场景集确定代表性场景及其概率, 根据实测功率匹配当前场景, 计算量大大减小, 其模型具有较高精度, 特别适用于大型双馈风电场的潮流及稳定性的统计特性的快速分析。

附图说明

[0026] 图 1 本发明所述方法流程图。

[0027] 图 2 从 PCC 公共接入点 (the Point of Common Coupling, PCC) 点观察到的三种 DFIG 典型动态特性。

[0028] 图 3 考虑注入风速及与 PCC 点之间阻抗值的双馈风电场分群准则。

[0029] 图 4 双馈风电场等值模型结构图。其中: $DFIG_{equ_i}$, $i = 1, 2, 3$ 为三类等值双馈发电机, 分别通过等效阻抗 z_{equ_i} 及变压器 T_{PCC} 连接至 PCC 点, PCC 点至电网连接阻抗为 Z_F , v_{equ_i} 为等效风速。

[0030] 图 5 算例系统结构图。其中: 双馈发电机 DFIG1 经 575v/20kv 变压器、线路 12-11、20kv/230kv 变压器及线路 10-9 接入左侧 IEEE3 机 9 节点系统的母线 9; 风电场其余双馈发电机接入方式与此相似。

[0031] 图 6 初始场景及概率等值模型时线路 9-10 的概率潮流对比图。其中: “实线” 为初始场景, “***” 为概率等值模型。

[0032] 图 7 不同发电机、不同振荡模式阻尼系数的概率分布图。图 7(a)、7(b) 依次为发

电机 G2、发电机 G3 阻尼系数的概率分布。其中：“ooo”对应 $f = 2.2\text{Hz}$ 振荡模式，“+++”对应 $f = 1.4\text{Hz}$ 振荡模式。

具体实施方式

[0033] 本发明提出的基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法，根据 DFIG 的特点，双馈风电场等值模型由 3 类具有不同动态特性的 DFIG 等值机构成，在各种场景下，其等值模型结构保持不变，而每类等值机的注入风速、额定容量、与 PCC 点之间阻抗等特征参数随着风电场场景迁移而变化，具有随机性。同类等值机的动态特性相似，主要差别在于输出功率的大小。根据风速历史数据，可计算得出等值模型的初始样本集。再将每类等值机的动态特性用若干代表性的参数取值来刻画，对 3 类等值机的代表性模型进行组合，去除其中的无效样本，得出风电场特征参数的所有代表性取值，并统计出其累积概率。在实时运行中，可进一步根据广域监测系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 实测的 PCC 点注入功率，匹配出与当前场景最为吻合的少量代表性场景。

[0034] 下面结合附图和实施例对本发明的技术方案做进一步说明。

[0035] 一种基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法，首先获取待等值 DFIG 风电场电气参数及风速历史数据，其特征在于所述方法还包括以下步骤：

[0036] (1) 通过离线计算、确定双馈风电场分群准则；

[0037] (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算，生成等值模型初始样本集；

[0038] (3) 提取各类等值机的代表性参数取值，组合生成风电场各种代表性场景；

[0039] (4) 根据风电场实测功率，匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景；

[0040] (5) 应用双馈风电场概率等值模型，根据需要对系统进行分析计算。

[0041] 所述的步骤 (1) 通过离线计算、确定双馈风电场分群准则，其过程是：

[0042] 根据 DFIG 的注入风速及到公共接入点 (the Point of Common Coupling, PCC) 的阻抗大小将风电场中 DFIG 分为 3 群，分群方案根据 DFIG 的风速及到 PCC 点的阻抗所对应的点在参数平面上的位置决定，当该点位于不同区域时，DFIG 分别呈现出三种不同的动态特性；对给定风电场，可通过离线数值计算具体确定参数平面各区之间的分界线。

[0043] 所述的步骤 (2) 对风电场风速历史数据进行等值计算，生成等值模型初始样本集，其过程是：

[0044] 设风电场共有 n_s 组风速历史数据，即 n_s 个场景，对每个场景逐一进行分群等值计算；将 DFIG 分为 3 群进行聚合；以第 i ($i = 1, 2, 3$) 群为例，若 DFIG 机组型号相同，则等值机与单台 DFIG 参数的标么值（以发电机自身容量为基准容量）相等，等值机容量 S_{equ_i} 等于单机容量总和；等值 DFIG 的输出机械功率等于群内各机输出机械功率的总和，再由等值机的功率-转速特性可求出等值机风速 v_{equ_i} ；等值 DFIG 的变流器环节直流电容值为群内单台 DFIG 电容的总和；

[0045] 将 DFIG 视为暂态电抗为 $X_{\text{dfig}} = X_s + \frac{X_m X_r}{X_m + X_r}$ 的电压源，其中， X_s , X_r , X_m 分别

为 DFIG 定子电抗、转子电抗及励磁电抗。根据戴维南定理可求出等值 DFIG 与 PCC 点之间的等值连接阻抗 Z_{equ_i} ；定义 $C_i = [S_{\text{equ}_i} \ v_{\text{equ}_i} \ Z_{\text{equ}_i}]$ 为第 i 群 DFIG 等值机的参数矢量， C

$= [C_1 \ C_2 \ C_3]$ 为双馈风电场等值模型的参数矢量, 则 $\{C_i^{(k)}, k=1, \dots, n_s\}$ 为第 i 群等值机的初始样本集, 而 $\{C^{(k)}, k=1, \dots, n_s\}$ 构成了双馈风电场等值模型的初始样本集。

[0046] 所述的步骤 (3) 提取各类等值机的代表性参数取值, 组合生成风电场各种代表性场景, 其过程是:

[0047] 第 i ($i=1, 2, 3$) 群 DFIG 等值机的参数 C_i 取不同值时, 风电场 PCC 点的无功功率及电压相差很小, 主要差别在于 PCC 点输出有功功率的幅值; 将第 i 群等值机输出功率的变化范围划分为 m_i 个子区间, 输出功率位于同一子区间的所有样本则用一个代表性参数 \bar{C}_i 来近似刻画;

[0048] 在参数取 \bar{C}_i 时, DFIG 等值机输出功率与该子区间内所有样本输出功率的期望值之间偏差最小; 由此, 提取出第 i 群等值机的 m_i 个代表性参数 $\{\bar{C}_i^{(k)}, k=1, \dots, m_i\}$, 用来近似描述第 i 群等值机各种可能的动态特性; 将风电场等值模型所含三类等值机的代表性取值进行组合, 共生成 $m_1 \times m_2 \times m_3$ 种代表性场景, 对应的代表性场景集为 $\{\bar{C}^{(k)}, k=1, \dots, m_1 \times m_2 \times m_3\}$; 去除其中一些不满足总容量不变原则的无效组合, 得出 n_r 个有效的代表性场景;

[0049] 根据初始样本集统计出每一种代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的累积概率 p_k , 最终得到双馈风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k=1, \dots, n_r\}$ 。

[0050] 所述的步骤 (4) 根据风电场实测功率, 匹配出与当前场景最为吻合的若干代表性场景, 其过程是:

[0051] 设现场实测风电场输出功率为 $P_{PCC,m}$, 当前场景 C_{curr} 与代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配度

$$\text{为: } K_k = \begin{cases} \frac{p_k}{\sum_j p_j} \exp(-|P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(k)}|), & j \in \{|P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(j)}| \leq \varepsilon\} \\ 0, & \text{if } |P_{PCC,m} - P_{PCC}^{(k)}| \geq \varepsilon, \quad k=1, 2, \dots, n_r \end{cases} \quad \text{其中, } P_{PCC}^{(k)} \text{ 为风电场}$$

代表性场景 $\bar{C}^{(k)}$ 所对应的输出功率; 匹配度 K_k 是实测 $P_{PCC,m}$ 及代表性场景输出功率之间偏差的逆指数函数, 并与代表性场景出现概率 p_k 成正比; 若两者偏差大于 ε , 则认为匹配度为零; ε 为预设值, 一般可取单台 DFIG 容量的 4-5 倍; 进一步对 K_k 进行归一化处理, 得出 C_{curr} 与 $\bar{C}^{(k)}$ 的匹配概率; 按照匹配概率大小排序, 得出与当前场景最为吻合的少数代表性场景。

[0052] 所述的步骤 (5) 应用双馈风电场概率等值模型, 根据需要对系统进行分析计算, 其过程是:

[0053] 根据风电场代表性场景 $\{\bar{C}^{(k)}, k=1, \dots, n_r\}$ 及其概率分布, 计算风电系统的概

率潮流；利用实时信息匹配出的少数代表性场景，分析系统机电振荡的概率稳定性，开展快速地在在线分析。

[0054] 实施例：

[0055] 将本发明基于离线计算和在线匹配的双馈风电场概率等值建模方法应用于如图 5 所示的算例系统。算例系统由 IEEE 三机九节点系统扩展而成，其中 IEEE 三机九节点部分取 IEEE 标准参数，母线 1 为平衡节点，母线 9 为 PCC 点。风电场由 60 台 DFIG 风力发电机构成，DFIG 经过两级变压器升压后通过线路 9-10 接入电网。DFIG 额定容量为 1.5MVA，额定电压为 575V；DFIG 参数： $[R_s, X_s, R_r, X_r, X_m] = [0.007, 0.171, 0.005, 0.156, 2.9]$ p.u.， $H = 5.04s$ ， $F = 0.01$ 。

[0056] 风电场网络参数：第 1 级升压变压器变比为 0.575/20kV，容量为 2MVA， $X_{T1} = 0.05$ p.u.；第 2 级升压变压器变比为 20/230kV，容量为 100MVA， $X_{T2} = 0.05$ p.u.。 $Z_{9-10} = 0.001 + 0.0058j$ ， $Z_{11-12} = 0.0084 + 0.0495j$ ， $Z_{11-13} = 2 \times (0.0084 + 0.0495j)$ ， $Z_{11-14} = 3 \times (0.0084 + 0.0495j)$ ， $Z_{11-15} = 4 \times (0.0084 + 0.0495j)$ ， $Z_{11-16} = 5 \times (0.0084 + 0.0495j)$ ， $Z_{11-17} = 6 \times (0.0084 + 0.0495j)$ 。（线路参数为标幺值，基准容量为 100MVA）。应用 Matlab/Simulink 软件对算例系统进行了仿真研究。

[0057] 取江苏某地风电场 2008 年全年的观测数据作为算例风电场风速历史数据，每 15 分钟记录一组风速数据，全年共记录 35040 个场景。对场景逐一进行分析，先按图 3 所示的分群准则将风电场内 DFIG 分为 3 群，用三台等值机替代，根据风机等值理论求取每台等值机的容量、风速及到 PCC 点的阻抗，得出每个场景下的参数矢量 C_1 、 C_2 、 C_3 及 C ，由初始场景计算出 35040 个参数矢量样本。根据等值 DFIG 输出的有功功率变化情况，将等值机 1 分为七类：1) 不存在；2) 存在但等值风速过低，风机未起动；3) $P \in (0, 1.5]$ ；4) $P \in (1.5, 3.0]$ ；5) $P \in (3.0, 5.0]$ ；6) $P \in (5.0, 7.5]$ ；7) $P > 7.5$ 。类似的，将等值机 2 分为六类：1) 不存在；2) $P \leq 7.5$ ；3) $P \in (7.5, 10]$ ；4) $P \in (10, 15]$ ；5) $P \in (15, 25]$ ；6) $P > 25$ 。将等值机 3 分为五类：1) 不存在；2) $P \leq 15$ ；3) $P \in (15, 22]$ ；4) $P \in (22, 30]$ ；5) $P > 30$ 。计算出属于各子类的所有等值机样本输出期望值，选择与期望输出值偏差最小的样本为该子类的代表性取值。将等值机 1 的 7 个代表性取值 \bar{C}_1 、等值机 2 的 6 个代表性取值 \bar{C}_2 及等值机 3 的 5 个代表性取值 \bar{C}_3 组合得 210 种代表性场景，去除不满足总容量不变原则的无效场景后，共得 135 个有效的代表性场景，统计其累计概率 p_k ，建立算例风电场的概率等值模型 $\{\bar{C}^{(k)}, k = 1, \dots, 135\}$ 。

[0058] 应用该模型对系统的概率潮流进行了计算，线路 10-9 在初始场景及概率等值模型下的潮流分布如图 6 所示，两者概率分布曲线基本一致。进一步计算可知，初始场景时输出功率的期望与方差分别为 8.6282MW 及 7.6922.MW，而使用概率等值模型时，对应值分别为 8.3703MW 及 7.7684MW，等值前后误差很小，系统的静态特性得到了很好保持。

[0059] 应用风电场概率模型分析系统的动态特性。假设 1 秒时母线 9 发生三相对地短路故障，0.1 秒后故障切除，记录发电机 G2、G3 的功角振荡曲线并应用 Prony 算法分析其振荡模式及阻尼系数。研究表明，发电机 G2、G3 的功角振荡均包含 $f = 2.2\text{Hz}$ 及 $f = 1.4\text{Hz}$ 两个振荡模式， $f = 2.2\text{Hz}$ 振荡模式的阻尼系数大于 $f = 1.4\text{Hz}$ 模式，在相同场景下发电机 G2

的阻尼系数大于 G3 的阻尼系数,系统阻尼系数的概率分布如图 7 所示。总的来看,该风电系统稳定,但在部分场景下,系统的最小阻尼低于 3%,存在阻尼不足的问题,需要采取进一步的控制措施。

[0060] 设现场实测的风电场输出功率为 11.5MW,按照本发明中提供的方法进行场景匹配,得出了 26 个最具代表性场景,并计算出其匹配概率。这样就实现了用少数场景来近似表示风电场当前等值模型的统计规律,为在线的控制器参数优化提供了模型准备。限于篇幅,仅在表 1 中列出了匹配概率最大的 3 个代表性取值。

[0061] 表 1 $P_{pcc} = 11.5\text{MW}$ 时风电场匹配度最高的 3 个代表性场景

[0062]

代表性场景号	等值机	S_{equ} (MW)	v_{equ} m/s	Z_{equ} (p.u.)	匹配概率
代表性场景 1	$DFIG_{equ1}$	75	5.5057	$0.0062 + 0.0371j$	0.1262
	$DFIG_{equ2}$	15	11.6331	$0.0168 + 0.0990j$	
	$DFIG_{equ3}$	不存在	---	----	
代表性场景 2	$DFIG_{equ1}$	60	5.4138	$0.0051 + 0.0306j$	0.1068
	$DFIG_{equ2}$	30	9.9531	0.0231	

[0063]

代表性场景 3				$+ 0.1360j$	0.1009
	$DFIG_{equ3}$	不存在	---	----	
	$DFIG_{equ1}$	75	5.1804	$0.0066 + 0.0392j$	
	$DFIG_{equ2}$	15	11.5377	$0.0084 + 0.0495j$	
	$DFIG_{equ3}$	不存在	---	----	

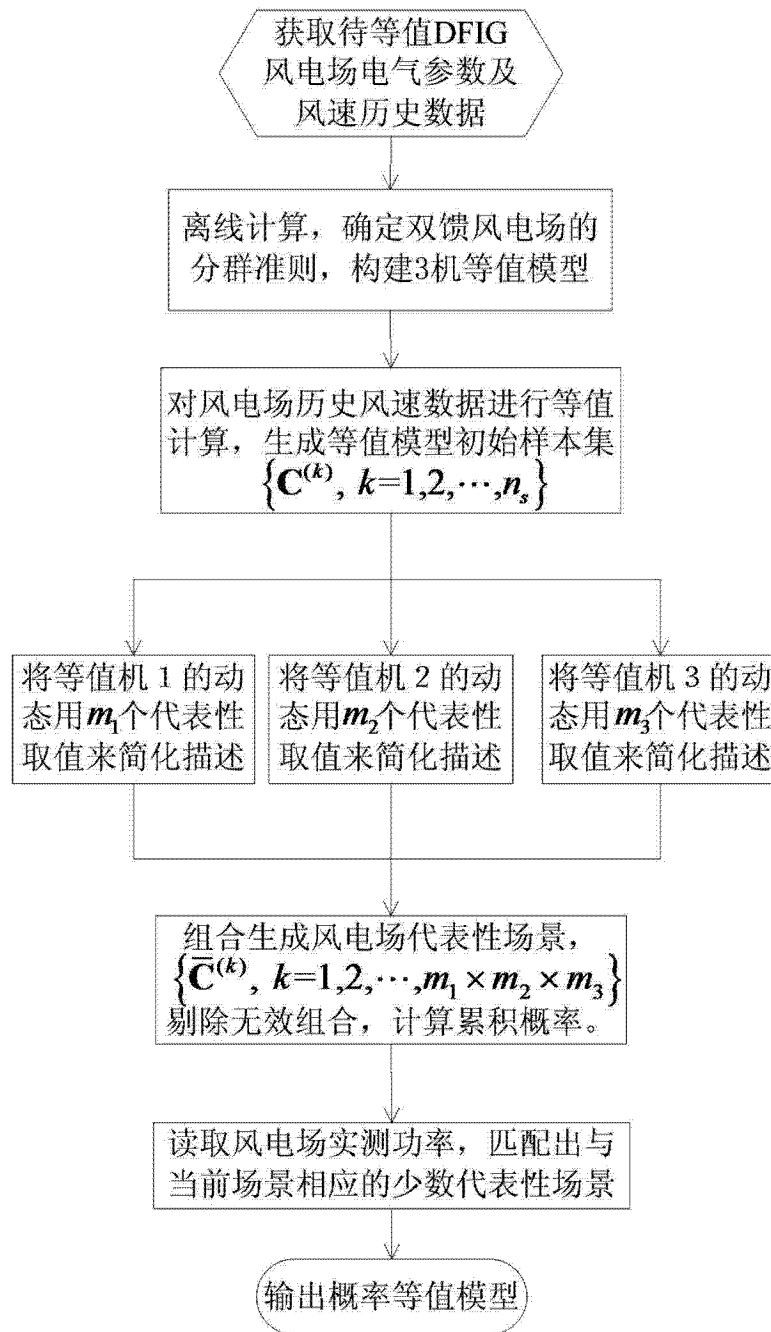


图 1

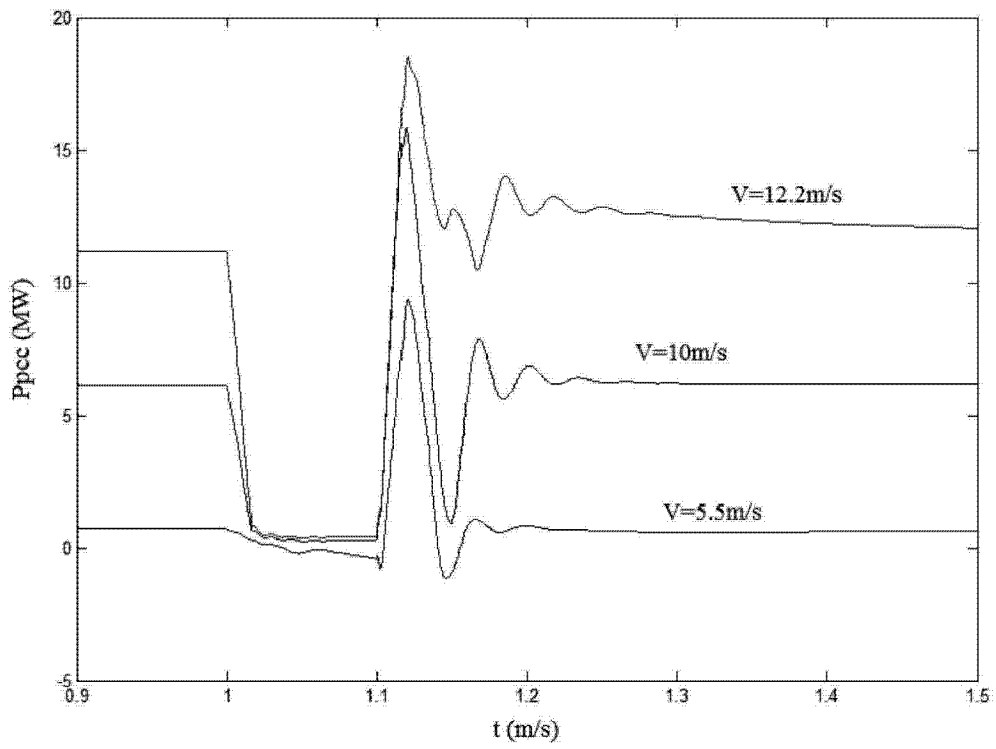


图 2

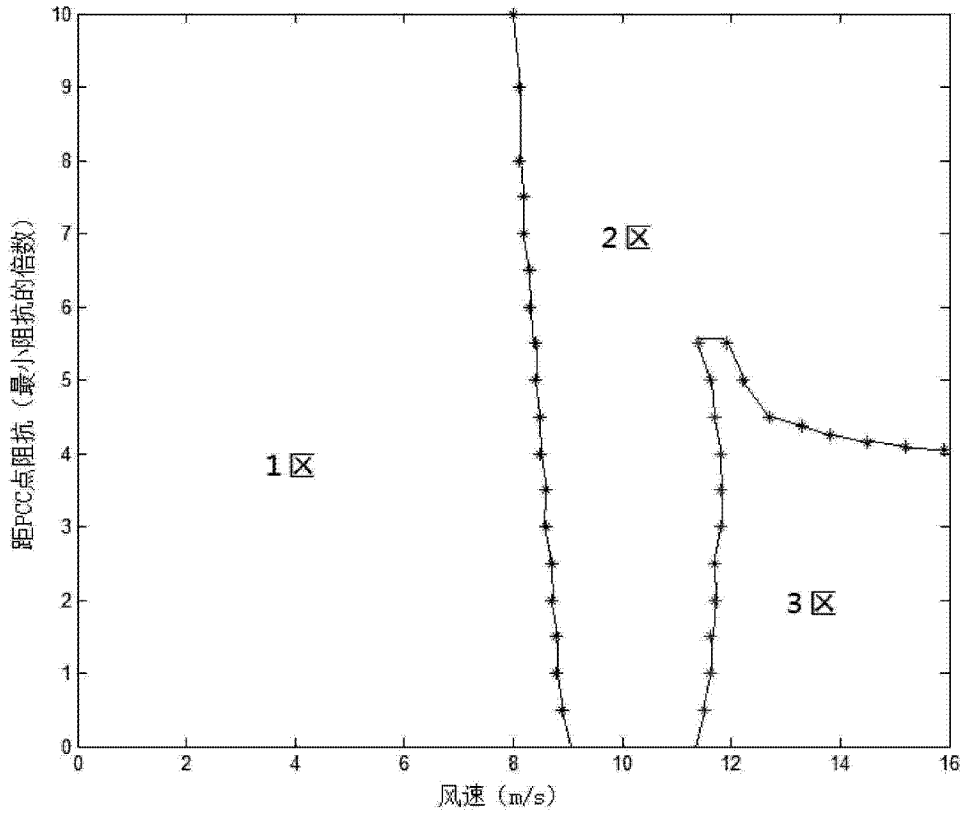


图 3

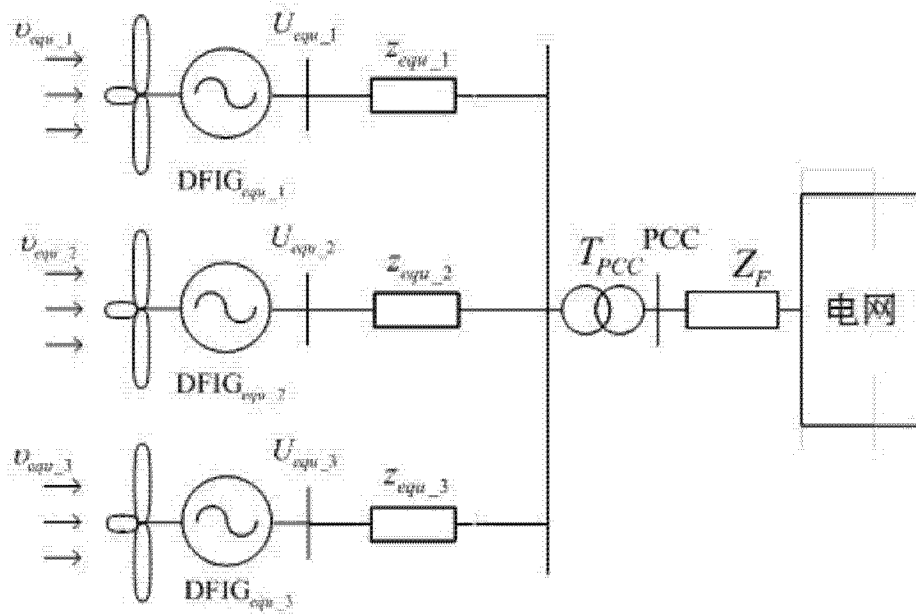


图 4

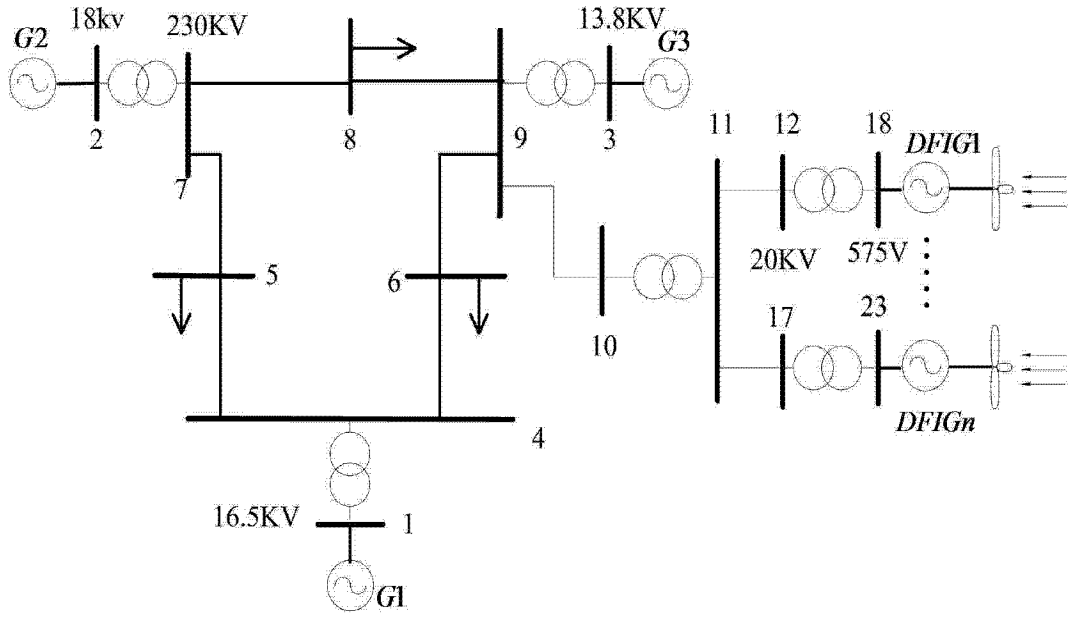


图 5

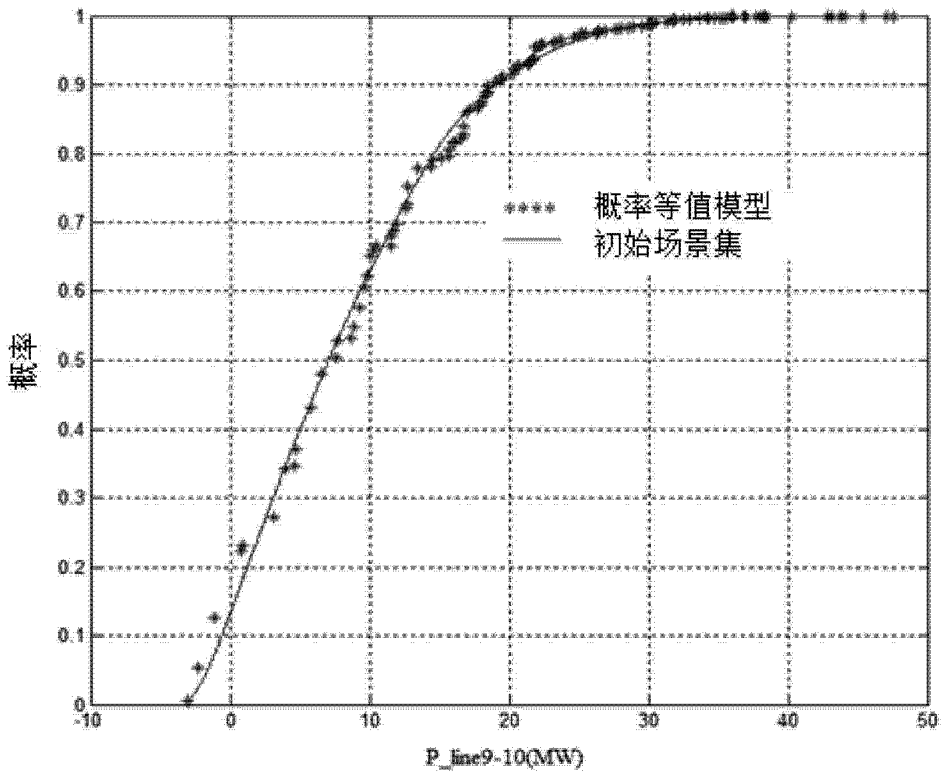


图 6

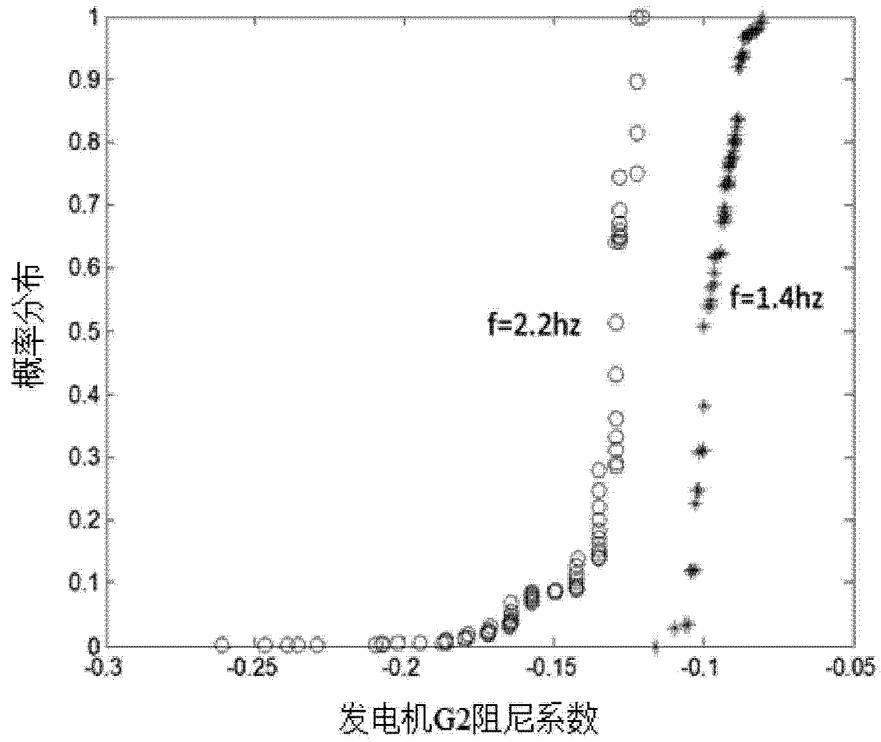


图 7(a)

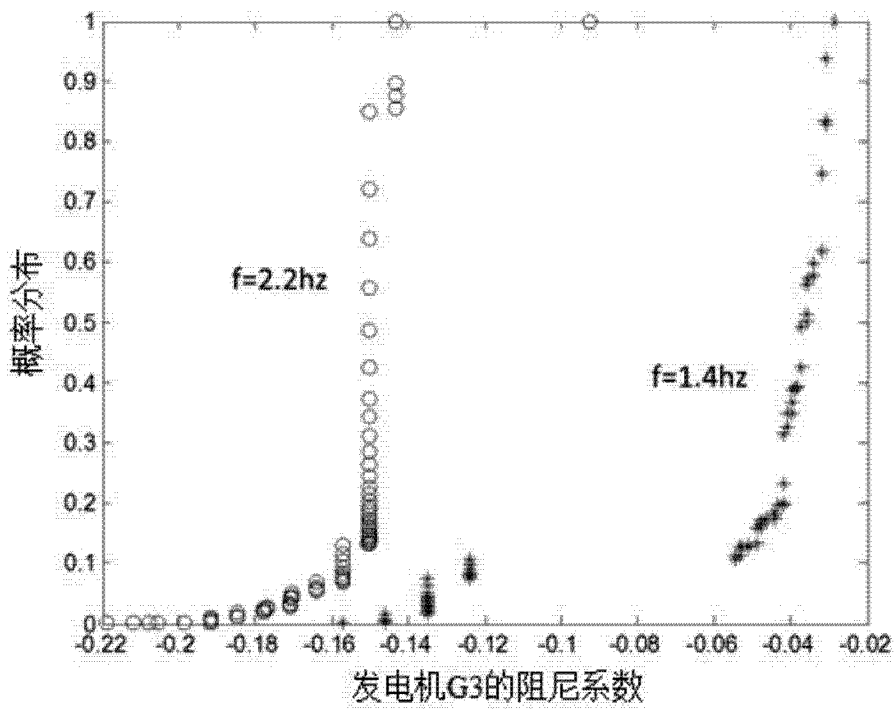


图 7(b)