



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111641229 B

(45) 授权公告日 2022.07.01

(21) 申请号 202010548069.3

H02J 3/01 (2006.01)

(22) 申请日 2020.06.16

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

WO 2011060130 A1, 2011.05.19

申请公布号 CN 111641229 A

CN 101949774 A, 2011.01.19

(43) 申请公布日 2020.09.08

CN 110676874 A, 2020.01.10

(73) 专利权人 山东大学

CN 108923463 A, 2018.11.30

地址 250061 山东省济南市历下区经十路
17923号

CN 106026175 A, 2016.10.12

Uriel Vargas, Abner Ramirez. Extended Harmonic Domain Model of a Wind Turbine Generator for Harmonic Transient Analysis.《IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY》.2016, 第31卷(第3期),

(72) 发明人 孙媛媛 许庆燊 李亚辉 王庆岩
路彤 庄静茹

审查员 时海涛

(74) 专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

专利代理师 闫圣娟

(51) Int. Cl.

H02J 3/38 (2006.01)

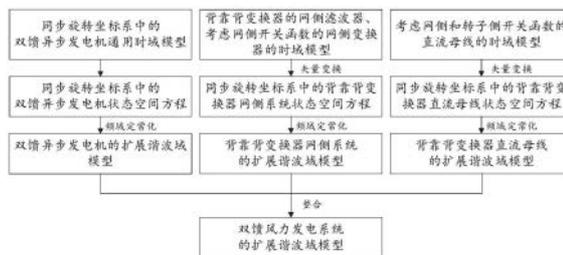
权利要求书4页 说明书11页 附图3页

(54) 发明名称

基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法及系统

(57) 摘要

本公开提出了基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法及系统,其中,动态模型包括:分别针对风力发电机、背靠背变换器的网侧系统和直流母线建立基于扩展谐波域的双馈异步发电机动态模型、基于扩展谐波域的变换器网侧系统动态模型和基于扩展谐波域的变换器直流母线动态模型。同时还将变换器两侧的开关函数产生的谐波含量考虑在网侧系统和直流母线的扩展谐波域模型中。将发电机、背靠背变换器的网侧系统和直流母线共三个子模型合并为一个谐波状态空间方程,得到双馈风力发电系统的扩展谐波域模型,实现了对发电机定转子电流的动态跟踪,不仅能精准表征基频电流的变化,亦可用于分析高倍频定子谐波电流特征,达到监测和准确评估的目的。



1. 基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法,其特征是,包括如下步骤:
 分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型;
 分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据;
 针对建立的时域模型,通过矢量变换以及频域定常化,根据获取的电气参数数据分别
 针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型;
 针对风力发电机建立基于扩展谐波域的双馈异步发电机动态模型的方法,包括如下步
 骤:

根据双馈异步发电机的dq等效电路模型,以定子电流和转子电流为状态量,以定子电
 压和转子电压为输入量,建立双馈异步发电机的状态空间方程,具体为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{pmatrix} \begin{matrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 + \omega_s (L_s L_r - L_m^2) \\ -\omega_m L_m^2 - \omega_s (L_s L_r - L_m^2) & R_s L_r \\ R_s L_m & -\omega_m L_m L_s \\ \omega_m L_m L_s & R_s L_m \\ R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ -\omega_m L_m L_r & R_r L_m \\ -R_r L_s & -\omega_m L_r L_s + \omega_{s_{Toep}} (L_s L_r - L_m^2) \\ \omega_m L_r L_s - \omega_{s_{Toep}} (L_s L_r - L_m^2) & -R_r L_s \end{matrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

式中, ω_m 是发电机转子电角频率, ω_s 是发电机定子角频率, $\omega_{s_{Toep}}$ 是 ω_s 的托普利兹矩阵形式, i_{ds} 和 i_{qs} 分别是定子电流 \bar{i}_s 的d轴和q轴分量; i_{dr} 和 i_{qr} 分别是转子电流 \bar{i}_r 的d轴和q轴分量; R_s 为发电机定子电阻, R_r 为发电机转子电阻, L_s 、 L_r 、 L_m 分别为发电机定子电感、转子电感和励磁电感; v_{ds} 和 v_{qs} 分别是定子电压 \bar{v}_s 的d轴和q轴的分量; v_{dr} 和 v_{qr} 分别是转子电压 \bar{v}_r 的d轴和q轴分量;

根据双馈异步发电机的状态空间方程和扩展谐波域核心方程,采用频域定常化方法获得双馈异步发电机的扩展谐波域动态模型;

获取风力发电机的电气参数数据,确定双馈异步发电机的谐波状态空间模型的系数,建立最终的双馈异步发电机的谐波状态空间模型;

针对背靠背变换器网侧系统建立基于扩展谐波域的变换器网侧动态模型的方法,包括如下步骤:

根据网侧系统等效电路模型及理想双向开关函数,建立网侧变换器模型,以及网侧变换器连接到电网的三相感性滤波器模型;

对网侧变换器模型和三相感性滤波器模型中的三相变量进行矢量变换,然后整合为同

步旋转坐标系中网侧系统以状态空间方程形式描述的动态数学模型;

采用频域定常化方法将网侧系统的状态空间方程转化至扩展谐波域中;

针对直流母线建立基于扩展谐波域的变换器直流母线动态模型的方法,如下:

根据理想双向开关函数及两电平拓扑背靠背变换器,获得直流母线的直流输入和直流输出关系;获取直流母线的电容参数,建立直流母线的动态数学模型;将转子变量通过逆旋转变换转换到定子坐标系中,对三相变量进行矢量变换,建立同步旋转坐标系中直流母线的状态空间方程;

以直流母线电容电压为状态量,根据扩展谐波源核心方程,在原状态空间方程的左侧新增状态量的微分项;对直流母线的状态空间方程中的各状态量和输入量采用双边傅里叶分解成为谐波空间矢量,获得背靠背变换器直流母线的谐波状态空间模型,即获得扩展谐波域的变换器直流母线动态模型,表示为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{C_1} \\ V_{C_2} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} V_{C_1} \\ V_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S_{sa1}}{C_1} & \frac{S_{sb1}}{C_1} & \frac{S_{sc1}}{C_1} \\ \frac{S_{sa2}}{C_2} & \frac{S_{sb2}}{C_2} & \frac{S_{sc2}}{C_2} \end{bmatrix} \mathbf{C}_{3/2}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{S_{ra1}}{C_1} & \frac{S_{rb1}}{C_1} & \frac{S_{rc1}}{C_1} \\ \frac{S_{ra2}}{C_2} & \frac{S_{rb2}}{C_2} & \frac{S_{rc2}}{C_2} \end{bmatrix} \mathbf{C}_{3/2}^{-1} \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

式中, V_{C_1} 和 V_{C_2} 幅值相等, 相位相反, 分别代表直流母线上两个电容的对地电压; C_1 、 C_2 为直流母线上大小相等的对地电容; 理想双向开关函数 S_{sa1} 、 S_{sa2} 、 S_{sb1} 、 S_{sb2} 、 S_{sc1} 、 S_{sc2} 分别表示网侧变换器A、B、C三相上下桥臂的开关状态; 理想双向开关函数 S_{ra1} 、 S_{ra2} 、 S_{rb1} 、 S_{rb2} 、 S_{rc1} 、 S_{rc2} 分别表示转子侧变换器A、B、C三相上下桥臂的开关状态; I_{dg} 和 I_{qg} 分别对应网侧变换器输入电网的电流的d轴和q轴的分量; I_{dr} 和 I_{qr} 分别对应转子输入转子侧变换器的电流的d轴和q轴的分量; $\mathbf{C}_{3/2}$ 是将abc三相坐标系变量转换到dq坐标系的变换矩阵, 上标-1表示逆矩阵; \mathbf{M}^{-1} 是旋转变换矩阵的逆;

整合建立的扩展谐波域模型, 以电机定子端电压为输入, 输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量, 得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型, 具体表示为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_6 & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_8 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_5 & \mathbf{Z}_4 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_7 \\ \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} V_{ds}$$

其中, 系数矩阵中各元素表达式分别表示为:

$$\mathbf{Z}_1 = - \left(\frac{R_g}{L_g} \right) \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}_{sTop} \mathbf{E};$$

$$\mathbf{Z}_2 = \left(\frac{1}{L_g} \right) \mathbf{I};$$

$$\mathbf{Z}_3 = -\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_s & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{sa1} - \mathbf{S}_{sa2}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sb1} - \mathbf{S}_{sb2}}{L_g} \\ \frac{\mathbf{S}_{sc1} - \mathbf{S}_{sc2}}{L_g} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_4 = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{sa1}}{C_1} & \frac{\mathbf{S}_{sb1}}{C_1} & \frac{\mathbf{S}_{sc1}}{C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_s - \mathbf{E} \sin \theta_s \\ \mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) - \mathbf{E} \sin \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \mathbf{I} \cos \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) - \mathbf{E} \sin \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_5 = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{ra1}}{C_1} (\mathbf{I} \cos(\theta_s - \theta_m) + \mathbf{E} \sin(\theta_s + \theta_m)) \\ + \frac{\mathbf{S}_{rb1}}{C_1} \left(\mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \theta_m - \frac{2}{3} \pi \right) + \mathbf{E} \sin \left(\theta_s + \theta_m - \frac{2}{3} \pi \right) \right) \\ + \frac{\mathbf{S}_{rc1}}{C_1} \left(\mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \theta_m + \frac{2}{3} \pi \right) + \mathbf{E} \sin \left(\theta_s + \theta_m + \frac{2}{3} \pi \right) \right) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_6 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} -R_s L_r \mathbf{I} + (\boldsymbol{\omega}_{m_{Toep}} L_m^2 + \boldsymbol{\omega}_{s_{Toep}} (L_s L_r - L_m^2)) \mathbf{E} \\ R_s L_m \mathbf{I} - \boldsymbol{\omega}_{m_{Toep}} L_m L_s \mathbf{E} \\ R_r L_m \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}_{m_{Toep}} L_m L_r \mathbf{E} \\ -R_r L_s \mathbf{I} - (\boldsymbol{\omega}_{m_{Toep}} L_s L_r - \boldsymbol{\omega}_{s_{Toep}} (L_s L_r - L_m^2)) \mathbf{E} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_7 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} L_r \mathbf{I} \\ -L_m \mathbf{I} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{Z}_8 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} -L_m \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ L_s \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{M} \mathbf{C}_{3/2} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ra1} - \mathbf{S}_{ra2} \\ \mathbf{S}_{rb1} - \mathbf{S}_{rb2} \\ \mathbf{S}_{rc1} - \mathbf{S}_{rc2} \end{bmatrix};$$

利用所述整体扩展谐波域动态模型对风力发电系统的输出状态进行监测。

2. 如权利要求1所述的基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法,其特征是:频域定常化方法获得双馈异步发电机的扩展谐波域动态模型的步骤,具体为:在原状态空间的左侧新增状态量的微分项;各状态量和输入量通过双边傅里叶分解成为谐波空间矢量;建立包含谐波空间矢量各次谐波的傅里叶系数的列向量,对应作为状态量和输入量;根据状态量和输入量的维度变化调整原状态空间的系数矩阵。

3. 如权利要求1所述的基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法,其特征是:

针对风力发电机,需要获取的风力发电机的电气参数数据包括:风力发电机的电阻、电感和漏感,电阻包括定子电阻和转子电阻,电感包括发电机定子电感、转子电感和励磁电感,漏感包括定子漏感和转子漏感。

4.如权利要求1所述的基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法,其特征是:采用频域定常化方法将网侧系统的状态空间方程转化至扩展谐波域中的方法,具体为:

在原状态空间方程的左侧新增状态量的微分项;

各状态量和输入量通过双边傅里叶分解成为谐波空间矢量,向量内包含各次谐波的傅里叶系数;其中,还包括将网侧变换器的时域开关函数通过双边傅里叶分解获得扩展谐波域下的采用Toeplitz矩阵形式表示的开关函数;

原状态空间的系数矩阵跟随状态量和输入量的维度作出相应调整。

5.一种用于权利要求1-4任一所述的基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法的输出监测系统,其特征是,包括:

时域模型建立模块:被配置用于分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型;

数据获取模块:被配置用于分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据;

扩展谐波域模型建立模块:被配置用于针对建立的时域模型,通过矢量变换以及频域定常化,根据获取的电气参数数据分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型;

整合监测模块:被配置用于整合建立的扩展谐波域模型,以电机定子端电压为输入,输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量,得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型,利用所述模型对风力发电系统的输出状态进行监测。

6.一种电子设备,其特征是,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成权利要求1-4任一项方法所述的步骤。

7.一种计算机可读存储介质,其特征是,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成权利要求1-4任一项方法所述的步骤。

基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法及系统

技术领域

[0001] 本公开涉及风力发电相关技术领域,具体的说,是涉及基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法及系统。

背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本公开相关的背景技术信息,并不必然构成在先技术。

[0003] 为缓解能源危机,减轻环境污染,可再生能源发电迅速崛起。风电作为中国第三大电源,双馈异步风力发电机(Doubly-Fed Induction Generator,DFIG)是并网风机中的主流机型。风速变化具有的随机性、间歇性特点导致电能输出不稳定,因此风力发电并网时需接入大量电力电子装置以控制输出电能符合并网标准。而电力电子装置的应用同时引入了高频次、宽频域的不确定性谐波电流,当发电机定子电压和电流中含有谐波分量时,会使定子输出有功功率和无功功率发生脉动,易诱发风机与电网的振荡、瞬时谐波相互作用和电压闪变等复杂问题,严重时导致风机解列,影响电网安全稳定运行。双馈风力发电系统内部谐波的影响因素众多,包括电网背景谐波、电力电子器件调制等,要准确把握双馈风机的谐波输出特征,首先要建立精确的风机动态模型,分析其内部的暂态变化过程,获知电机谐波电流的连续时间域的变化情况以及可能的暂态不安全行为,为进一步研究风机与电网间的谐波相互作用提供理论基础,并为后续设计滤波器和改善控制策略提供模型基础。

[0004] 国内外学者在建立双馈风力发电系统的动态模型方面已有一定研究,分析风机并网点谐波特性主要运用时域仿真方法,量化不同出力和风况下的谐波变化,并给出风机并网点的谐波频谱。对于双馈风力发电机,发电机模型的选择影响定子电流计算的精度。然而双馈风力发电系统复杂的系统构造和控制策略制约了模型精度,大部分动态模型对风机进行了不同程度的简化,常基于简化的背靠背变换器建立风机的平均值模型。发明人发现,简化背靠背变换器,忽略开关调制过程,会导致模型分析谐波的准确度降低,同时对风机运行的暂态过程及其控制的把握也会有偏差。同时,现有平均模型一般应用于连续时不变系统,不满足跟踪系统内各变量的动态变化的要求。另一方面,现有的风机通用平均模型通过dq坐标变换,使基频成分在dq坐标系下转换为直流量,但是单一的dq变换无法顾及到其他稳态谐波,应用于分析谐波特性计算量较大。

发明内容

[0005] 本公开为了解决上述问题,提出了基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法及系统,扩展谐波域模型考虑了双馈异步发电机定子电压、定子电流、转子电压和转子电流的各次谐波的状态空间模型,既适用于表征暂态情况下的谐波动态,又可用于分析稳态情况下发电机定子输出电流的谐波特征,达到监测和准确评估的目的。

[0006] 为了实现上述目的,本公开采用如下技术方案:

[0007] 一个或多个实施例提供了基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法,包

括如下步骤：

[0008] 分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型；

[0009] 分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据；

[0010] 针对建立的时域模型，通过矢量变换以及频域定常化，根据获取的电气参数数据分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型；

[0011] 整合建立的扩展谐波域模型，以电机定子端电压为输入，输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量，得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型，利用所述模型对风力发电系统的输出状态进行监测。

[0012] 一个或多个实施例提供了基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测系统，包括：

[0013] 时域模型建立模块：被配置用于分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型；

[0014] 数据获取模块：被配置用于分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据；

[0015] 扩展谐波域模型建立模块：被配置用于针对建立的时域模型，通过矢量变换以及频域定常化，根据获取的电气参数数据分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型；

[0016] 整合监测模块：被配置用于整合建立的扩展谐波域模型，以电机定子端电压为输入，输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量，得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型，利用所述模型对风力发电系统的输出状态进行监测。

[0017] 一种电子设备，包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令，所述计算机指令被处理器运行时，完成权利要求上述方法所述的步骤。

[0018] 一种计算机可读存储介质，用于存储计算机指令，所述计算机指令被处理器执行时，完成上述方法所述的步骤。

[0019] 与现有技术相比，本公开的有益效果为：

[0020] 本公开建立了双馈风力发电系统“频域定常化”后的扩展谐波域模型，既适用于表征暂态情况下的谐波动态，又可用于分析稳态情况下整个发电系统内部变量的谐波特征，达到监测和准确评估的目的。

[0021] 本公开提出的方法打破现有风机通用平均模型通过dq坐标变换计算单一稳态谐波的局限，提出的扩展谐波域模型在状态空间内包含了状态变量、输入量和输出量的多个频率分量，能同时表示各变量的基频和倍数频率响应，分析的谐波次数还可任意选择，将其作为双馈风力发电系统的建模框架能大大降低谐波计算工作量。

附图说明

[0022] 构成本公开的一部分的说明书附图用来提供对本公开的进一步理解，本公开的示意性实施例及其说明用于解释本公开，并不构成对本公开的限定。

[0023] 图1为本公开实施例1的方法流程图；

[0024] 图2为本公开实施例1提供的同步旋转坐标系中双馈异步发电机的dq等效电路模

型图；

[0025] 图3为本公开实施例1提供的背靠背变换器的网侧系统和直流母线的简化模型图；

[0026] 图4为本公开实施例1提供的风速恒定下谐波稳态分析结果(EHD模型)与电磁暂态模型(EMT模型)仿真结果的发电机定子电流频谱对比图；

[0027] 图5为本公开实施例1的双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型与电磁暂态模型、平均模型在变化风速下直流母线电压变化的对比图；

[0028] 图6为本公开实施例1的双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型与电磁暂态模型、平均模型在变化风速下定子基频电流的对比图；

[0029] 图7为本公开实施例1的双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型与电磁暂态模型在变化风速下某个时间点对应的发电机定子谐波电流频谱对比图；

[0030] 图8为本公开实施例1的双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型在变化风速下发电机38次、42次、79次、81次定子谐波电流的动态变化过程。

具体实施方式：

[0031] 下面结合附图与实施例对本公开作进一步说明。

[0032] 应该指出，以下详细说明都是示例性的，旨在对本公开提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本公开所属技术领域的普通技术人员通常理解的相同含义。

[0033] 需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本公开的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。需要说明的是，在不冲突的情况下，本公开中的各个实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将结合附图对实施例进行详细描述。

[0034] 实施例1

[0035] 在一个或多个实施方式中公开的技术方案中，如图1所示，基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测方法，包括如下步骤：

[0036] S1、分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型；

[0037] S2、分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据；

[0038] S3、针对建立的时域模型，通过矢量变换以及频域定常化，根据获取的电气参数数据分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型；

[0039] S4、整合建立的扩展谐波域模型，以电机定子端电压为输入，输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量，得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型，利用所述模型对风力发电系统的输出状态进行监测。根据模型可以实现对风力发电系统有效监测和准确评估。

[0040] 本实施例采用频域定常化建立了双馈风力发电系统“频域定常化”后的扩展谐波域模型，既适用于表征暂态情况下的谐波动态，又可用于分析稳态情况下整个发电系统内部变量的谐波特征，通过本实施例的模型能够对风力发电系统实现有效监测和准确评估的目的。

[0041] 1) 针对风力发电机建立基于扩展谐波域的双馈异步发电机动态模型的方法,可以如下:

[0042] S101、针对双馈异步发电机,将定子电压、定子电流、转子电压和转子电流采用空间矢量描述。根据双馈异步发电机的dq等效电路模型,以定子dq轴电流和转子dq轴电流为状态量,以定子dq轴电压和转子dq轴电压为输入量,建立双馈异步发电机的状态空间方程;

[0043] S102、根据双馈异步发电机的状态空间方程和扩展谐波域核心方程,采用频域定常化方法获得双馈异步发电机的扩展谐波域动态模型;

[0044] S103、获取风力发电机的电气参数数据,确定双馈异步发电机的谐波状态空间模型的系数,建立最终的双馈异步发电机的谐波状态空间模型。

[0045] 其中,可选的,频域定常化方法具体为:在原状态空间的左侧新增状态量的微分项;各状态量和输入量通过双边傅里叶分解成为谐波空间矢量;建立包含谐波空间矢量各次谐波的傅里叶系数的列向量,对应作为状态量和输入量;根据状态量和输入量的维度变化调整原状态空间的系数矩阵。

[0046] 本实施例建立的双馈异步发电机的扩展谐波域动态模型是考虑双馈异步发电机定子电压、定子电流、转子电压和转子电流在dq坐标系下各次谐波的状态空间模型,既适用于表征暂态情况下的谐波动态,又可用于分析稳态情况下发电机定子输出电流的谐波特征,达到监测和准确评估的目的。

[0047] S101中,双馈异步发电机的定子电压、定子电流、转子电压和转子电流采用空间矢量描述,分别为 \bar{v}_s 、 \bar{i}_s 、 \bar{v}_r 、 \bar{i}_r 。

[0048] 可选的,本实施例的双馈异步发电机的dq等效电路模型可以如图2所示,等效电路模型中包含发电机定子电阻 R_s 和发电机转子电阻 R_r ,发电机定子电感 L_s 、转子电感 L_r 和励磁电感 L_m ,三个电感通过定子漏感 $L_{\sigma s}$ 、转子漏感 $L_{\sigma r}$ 实现关联,满足如下公式:

$$[0049] \begin{cases} L_s = L_{\sigma s} + L_m \\ L_r = L_{\sigma r} + L_m \end{cases}$$

[0050] 图2中,对d轴和q轴的分量分别通过等效电路表示,其中 v_{ds} 和 v_{qs} 分别是定子电压 \bar{v}_s 的d轴和q轴的分量; i_{ds} 和 i_{qs} 分别是定子电流 \bar{i}_s 的d轴和q轴分量; v_{dr} 和 v_{qr} 分别是转子电压 \bar{v}_r 的d轴和q轴分量; i_{dr} 和 i_{qr} 分别是转子电流 \bar{i}_r 的d轴和q轴分量。

[0051] 以定子dq轴电流和转子dq轴电流为状态量,定子dq轴电压和转子dq轴电压为输入量,建立双馈异步发电机的状态空间方程,可以具体如下:

$$[0052] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \left(\begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_m L_m^2 + \omega_s (L_s L_r - L_m^2) \\ -\omega_m L_m^2 - \omega_s (L_s L_r - L_m^2) & R_s L_r \\ R_s L_m & -\omega_m L_m L_s \\ \omega_m L_m L_s & R_s L_m \\ R_r L_m & \omega_m L_m L_r \\ -\omega_m L_m L_r & R_r L_m \\ -R_r L_s & -\omega_m L_r L_s + \omega_{s_{\text{Toep}}} (L_s L_r - L_m^2) \\ \omega_m L_r L_s - \omega_{s_{\text{Toep}}} (L_s L_r - L_m^2) & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \\ -L_m & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \right)$$

[0053] 式中, ω_m 是发电机转子电角频率, ω_s 是发电机定子角频率, $\omega_{s_{\text{Toep}}}$ 是 ω_s 的托普利兹矩阵形式 (Toeplitz-type matrix)。

[0054] 步骤102中, 扩展谐波域核心方程, 可以具体为:

$$[0055] \quad \dot{X} + DX = AX + BU$$

$$[0056] \quad Y = CX + EU$$

[0057] 根据步骤S101所得的状态空间方程, 代入扩展谐波域核心方程实现频域定常化。

[0058] 将各状态量和输入量通过双边傅里叶分解成为谐波空间矢量, 每个变量的结构表现为列向量 $[X_{-h_{\text{max}}} \cdots X_{-1} X_0 X_1 \cdots X_{h_{\text{max}}}]^T$, 向量内包含各次谐波的傅里叶系数。

原状态空间的系数矩阵跟随状态量和输入量的维度调整。得到同步旋转坐标系中双馈异步发电机的谐波状态空间模型表示为:

$$[0059] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \left(L_1 \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + L_2 \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \right)$$

系统的谐波状态空间模型,即获得扩展谐波域的变换器网侧系统动态模型,如下:

$$[0070] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{R_g}{L_g} \mathbf{I} & -\omega_{s_{Tesp}} \\ \omega_{s_{Tesp}} & \frac{R_g}{L_g} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} - \mathbf{C}_{3/2} \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{sa_1}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sa_2}}{L_g} \\ \frac{\mathbf{S}_{sb_1}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sb_2}}{L_g} \\ \frac{\mathbf{S}_{sc_1}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sc_2}}{L_g} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{C_1} \\ V_{C_2} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_g} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix}$$

[0071] 式中, R_g 是滤波器的电阻, L_g 是滤波器的电感; $\omega_{s_{Tesp}}$ 是发电机定子角速度的托普利兹矩阵;理想双向开关函数 S_{sa_1} 、 S_{sa_2} 、 S_{sb_1} 、 S_{sb_2} 、 S_{sc_1} 和 S_{sc_2} 分别表示网侧变换器A、B、C三相上下桥臂的开关状态; \mathbf{D} 由4个微分矩阵 $\mathbf{D}_0 = \text{diag}\{-j\hbar\omega_0 \cdots -j\omega_0 \quad 0 \quad -j\omega_0 \cdots j\hbar\omega_0\}$ 以对角线形式组成; \mathbf{I} 是单位矩阵,阶数为 $(2\hbar_{\max}+1)$; V_{C_1} 和 V_{C_2} 幅值相等,相位相反,分别代表直流母线上两个电容的对地电压; V_{ds} 和 V_{qs} 分别对应电网电压(定子电压) \bar{v}_s 的d轴和q轴的分量; I_{dg} 和 I_{qg} 分别对应网侧变换器输入电网的电流的d轴和q轴的分量; $\mathbf{C}_{3/2}$ 是将abc三相坐标系变量转换到dq坐标系的变换矩阵,表示为:

$$[0072] \quad \mathbf{C}_{3/2} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_s & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \\ -\mathbf{I} \sin \theta_s & -\mathbf{I} \sin \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) & -\mathbf{I} \sin \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix}$$

[0073] 式中, θ_s 表示定子电角位置。

[0074] 可选的,将网侧变换器的时域开关函数 S_{sa_1} 、 S_{sa_2} 、 S_{sb_1} 、 S_{sb_2} 、 S_{sc_1} 和 S_{sc_2} 通过双边傅里叶分解获得扩展谐波域下的开关函数 S_x ;获取定子角频率和开关函数对应各次谐波的傅里叶系数,确定扩展谐波域下的开关函数 S_x 的元素;开关函数 S_x 由开关调制方法决定,在扩展谐波域中表现为Toeplitz矩阵形式,表示为:

$$[0075] \quad \mathbf{S}_x = \begin{bmatrix} S_{x(0)} & S_{x(-1)} & \cdots & S_{x(-h)} \\ S_{x(1)} & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ \vdots & \ddots & S_{x(0)} & S_{x(-1)} & \ddots & \ddots \\ S_{x(h)} & \ddots & S_{x(1)} & S_{x(0)} & S_{x(-1)} & \ddots & S_{x(-h)} \\ & \ddots & \ddots & S_{x(1)} & S_{x(0)} & \ddots & \vdots \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & S_{x(-1)} \\ & & & S_{x(h)} & \cdots & S_{x(1)} & S_{x(0)} \end{bmatrix}$$

[0076] 本实施例以Toeplitz矩阵形式在扩展谐波域模型中体现了开关过程产生的谐波含量,同时还考虑了开关调制方法的特性。

[0077] 本实施例明确考虑了电力电子器件的开关过程,开关函数经傅里叶分解后可很容易在方程中体现,更适用于反应风机内部的动态响应,跟踪定子谐波电流的动态过程。

[0078] 3) 针对背靠背变换器直流母线建立基于扩展谐波域的变换器直流母线动态模型的方法,可以如下:

[0079] 针对两电平拓扑背靠背变换器,直流母线连接转子侧变换器和网侧变换器,各支路电流流向如图3所示。

[0080] S301、根据两电平拓扑背靠背变换器中各支路电流流向和理想双向开关函数,获得直流母线的直流输入和直流输出关系。获取直流母线的电容参数,建立直流母线的动态数学模型。再将转子变量通过逆旋转变换转换到定子坐标系中,对三相变量进行矢量变换,建立同步旋转坐标系中直流母线的状态空间方程。

[0081] S302、根据扩展谐波源核心方程,在原状态空间方程的左侧新增状态量的微分项;对直流母线的状态空间方程中的各状态量和输入量采用双边傅里叶分解成为谐波空间矢量,获得背靠背变换器直流母线的谐波状态空间模型,即获得扩展谐波域的变换器直流母线动态模型,表示为:

$$[0082] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{C_1} \\ V_{C_2} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} V_{C_1} \\ V_{C_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{S_{sa_1}}{C_1} & \frac{S_{sb_1}}{C_1} & \frac{S_{sc_1}}{C_1} \\ \frac{S_{sa_2}}{C_2} & \frac{S_{sb_2}}{C_2} & \frac{S_{sc_2}}{C_2} \end{bmatrix} \mathbf{C}_{3/2}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dg} \\ I_{qg} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{S_{ra_1}}{C_1} & \frac{S_{rb_1}}{C_1} & \frac{S_{rc_1}}{C_1} \\ \frac{S_{ra_2}}{C_2} & \frac{S_{rb_2}}{C_2} & \frac{S_{rc_2}}{C_2} \end{bmatrix} \mathbf{C}_{3/2}^{-1} \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix}$$

[0083] 式中, V_{C_1} 和 V_{C_2} 幅值相等,相位相反,分别代表直流母线上两个电容的对地电压;

C_1 、 C_2 为直流母线上大小相等的对地电容;理想双向开关函数 S_{sa_1} 、 S_{sa_2} 、 S_{sb_1} 、 S_{sb_2} 、 S_{sc_1} 、 S_{sc_2} 分别表示网侧变换器A、B、C三相上下桥臂的开关状态;理想双向开关函数

S_{ra_1} 、 S_{ra_2} 、 S_{rb_1} 、 S_{rb_2} 、 S_{rc_1} 、 S_{rc_2} 分别表示转子侧变换器A、B、C三相上下桥臂的开关状态; I_{dg} 和 I_{qg} 分别对应网侧变换器输入电网的电流的d轴和q轴的分量; I_{dr} 和 I_{qr} 分别对应转子输入转子侧变换器的电流的d轴和q轴的分量; $\mathbf{C}_{3/2}$ 是将abc三相坐标系变量转换到dq坐标系的变换矩阵,上标-1表示逆矩阵。

[0084] 其中, \mathbf{M}^{-1} 是旋转变换矩阵的逆,具体表示为:

$$[0085] \quad \mathbf{M}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_m & -\mathbf{I} \sin \theta_m \\ \mathbf{I} \sin \theta_m & \mathbf{I} \cos \theta_m \end{bmatrix}$$

[0086] 其中, θ_m 为转子电角位置。

[0087] 将转子侧变换器时域开关函数 S_{ra_1} 、 S_{ra_2} 、 S_{rb_1} 、 S_{rb_2} 、 S_{rc_1} 、 S_{rc_2} , 以及网侧变换器的时域开关函数 S_{sa_1} 、 S_{sa_2} 、 S_{sb_1} 、 S_{sb_2} 、 S_{sc_1} 、 S_{sc_2} 通过双边傅里叶分解,获得开关函数 S_x , 本步骤中扩展谐波域下的开关函数 S_x 的确定方法与步骤S202中的开关函数 S_x 相同,开关函数 S_x 作为扩展谐波域的变换器直流母线动态模型 S_{sa_1} 、

S_{sa_2} 、 S_{sb_1} 、 S_{sb_2} 、 S_{sc_1} 、 S_{sc_2} 、 S_{ra_1} 、 S_{ra_2} 、 S_{rb_1} 、 S_{rb_2} 、 S_{rc_1} 、 S_{rc_2} 提供取值。

[0088] 步骤4中,是对上述1)-3) 所获得的模型整合,获得双馈风力发电系统动态模型,具体整合的方法可以如下:

[0089] 由于 x_d 与 x_q 存在 90° 相位差,两者的关系式可表示为 $x_q = \mathbf{E}x_d$, 其中,

$$[0090] \quad \mathbf{E} = \text{diag} \left\{ e^{j\frac{\pi}{2}} \quad \dots \quad e^{j\frac{\pi}{2}} \quad 1 \quad e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad \dots \quad e^{-j\frac{\pi}{2}} \right\}$$

[0091] 则简化模型时,可只提取 x_d 为变量。

[0092] 平衡系统中,背靠背变换器中的直流母线上满足 $V_{C_1} = -V_{C_2}$,直流母线电压 $V_{dc} = V_{C_1} - V_{C_2}$ 。

[0093] 将上述获得的基于扩展谐波域的双馈异步发电机动态模型、背靠背变换器网侧系统动态模型和直流母线动态模型进行整合,使模型输入为电机定子端电压,输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量,即得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型,具体表示为:

$$[0094] \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_6 & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_8 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{Z}_1 & \mathbf{Z}_3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{Z}_5 & \mathbf{Z}_4 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{dr} \\ I_{dg} \\ V_{C_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_7 \\ \mathbf{Z}_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} V_{ds}$$

[0095] 其中,系数矩阵中各元素表达式分别表示为:

$$[0096] \quad \mathbf{Z}_1 = - \left(\frac{R_g}{L_g} \right) \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}_{\text{strop}} \mathbf{E}$$

$$[0097] \quad \mathbf{Z}_2 = \left(\frac{1}{L_g} \right) \mathbf{I}$$

$$[0098] \quad \mathbf{Z}_3 = -\frac{2}{3} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_s & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) & \mathbf{I} \cos \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{sa1} - \mathbf{S}_{sa2}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sa2}}{L_g} \\ \frac{\mathbf{S}_{sb1} - \mathbf{S}_{sb2}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sb2}}{L_g} \\ \frac{\mathbf{S}_{sc1} - \mathbf{S}_{sc2}}{L_g} & \frac{\mathbf{S}_{sc2}}{L_g} \end{bmatrix}$$

$$[0099] \quad \mathbf{Z}_4 = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{sa1}}{C_1} & \frac{\mathbf{S}_{sb1}}{C_1} & \frac{\mathbf{S}_{sc1}}{C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} \cos \theta_s - \mathbf{E} \sin \theta_s \\ \mathbf{I} \cos \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) - \mathbf{E} \sin \left(\theta_s - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \mathbf{I} \cos \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) - \mathbf{E} \sin \left(\theta_s + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix}$$

$$[0100] \quad \mathbf{Z}_5 = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{S}_{ra1}}{C_1} (\mathbf{I} \cos(\theta_s - \theta_m) + \mathbf{E} \sin(\theta_s + \theta_m)) \\ + \frac{\mathbf{S}_{rb1}}{C_1} \left(\mathbf{I} \cos\left(\theta_s - \theta_m - \frac{2}{3}\pi\right) + \mathbf{E} \sin\left(\theta_s + \theta_m - \frac{2}{3}\pi\right) \right) \\ + \frac{\mathbf{S}_{rc1}}{C_1} \left(\mathbf{I} \cos\left(\theta_s - \theta_m + \frac{2}{3}\pi\right) + \mathbf{E} \sin\left(\theta_s + \theta_m + \frac{2}{3}\pi\right) \right) \end{bmatrix}$$

$$[0101] \quad \mathbf{Z}_6 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} -R_s L_r \mathbf{I} + (\boldsymbol{\omega}_{mToep} L_m^2 + \boldsymbol{\omega}_{sToep} (L_s L_r - L_m^2)) \mathbf{E} \\ R_s L_m \mathbf{I} - \boldsymbol{\omega}_{mToep} L_m L_s \mathbf{E} \\ R_r L_m \mathbf{I} + \boldsymbol{\omega}_{mToep} L_m L_r \mathbf{E} \\ -R_r L_s \mathbf{I} - (\boldsymbol{\omega}_{mToep} L_s L_r - \boldsymbol{\omega}_{sToep} (L_s L_r - L_m^2)) \mathbf{E} \end{bmatrix}$$

$$[0102] \quad \mathbf{Z}_7 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} L_r \mathbf{I} \\ -L_m \mathbf{I} \end{bmatrix}$$

$$[0103] \quad \mathbf{Z}_8 = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \begin{bmatrix} -L_m \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ L_s \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{MC}_{3/2} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{ra1} - \mathbf{S}_{ra2} \\ \mathbf{S}_{rb1} - \mathbf{S}_{rb2} \\ \mathbf{S}_{rc1} - \mathbf{S}_{rc2} \end{bmatrix}$$

[0104] 为了说明本实施例的效果,进行了仿真实验:

[0105] 利用本实施例分析双馈风力发电系统在稳态和暂态情况下的谐波特性。图4给出了本实施例在恒定风速下的谐波稳态分析结果(EHD模型)与电磁暂态模型(EMT模型)仿真结果的对比,解析值与仿真值具有较好的一致性。

[0106] 图5给出了本实施例与电磁暂态模型、平均模型在变化风速下直流母线电压变化的对比,本实施例可及时跟踪风电系统内直流母线电压变量的动态响应;图6给出了本实施例与电磁暂态模型、平均模型在变化风速下定子基频电流的对比,本实施例可反映电流的冲击式不稳定性现象;图7给出了本实施例与电磁暂态模型在变化风速下某个时间点对应的发电机定子谐波电流频谱对比图;图8给出了本实施例变化风速下发电机38次、42次、79次、81次定子谐波电流的动态变化过程。可见,本实施例的算法明确考虑开关过程的数学模型更适用于反应风机内部的动态响应,跟踪定子谐波电流的动态过程,在稳态和暂态下均有较高的准确性,能够精确反映各次谐波的冲击跳变,及时反馈电能质量情况。

[0107] 实施例2

[0108] 本实施例提供基于扩展谐波域模型的风力发电系统输出监测系统,包括:

[0109] 时域模型建立模块:被配置用于分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立时域模型;

[0110] 数据获取模块:被配置用于分别获取风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线的电气参数数据;

[0111] 扩展谐波域模型建立模块:被配置用于针对建立的时域模型,通过矢量变换以及频域定常化,根据获取的电气参数数据分别针对风力发电机、变换器的网侧系统和直流母线建立扩展谐波域模型;

[0112] 整合监测模块:被配置用于整合建立的扩展谐波域模型,以电机定子端电压为输入,输出为电机定子电流、转子电流、网侧电流和变换器中直流母线电压的各次谐波分量,得到双馈异步风力发电机的整体扩展谐波域动态模型,利用所述模型对风力发电系统的输出状态进行监测。

[0113] 实施例3

[0114] 本实施例提供一种电子设备,包括存储器和处理器以及存储在存储器上并在处理器上运行的计算机指令,所述计算机指令被处理器运行时,完成实施例1的方法所述的步骤。

[0115] 实施例4

[0116] 本实施例提供一种计算机可读存储介质,用于存储计算机指令,所述计算机指令被处理器执行时,完成实施例1的方法所述的步骤。

[0117] 以上所述仅为本公开的优选实施例而已,并不用于限制本公开,对于本领域的技术人员来说,本公开可以有各种更改和变化。凡在本公开的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本公开的保护范围之内。

[0118] 上述虽然结合附图对本公开的具体实施方式进行了描述,但并非对本公开保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本公开的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本公开的保护范围以内。

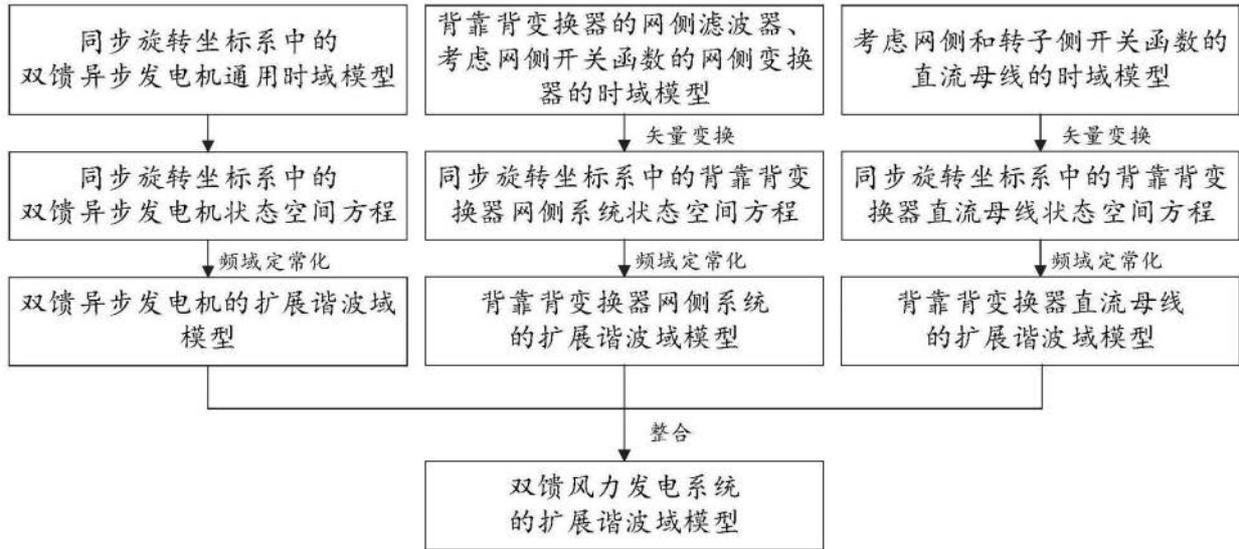


图1

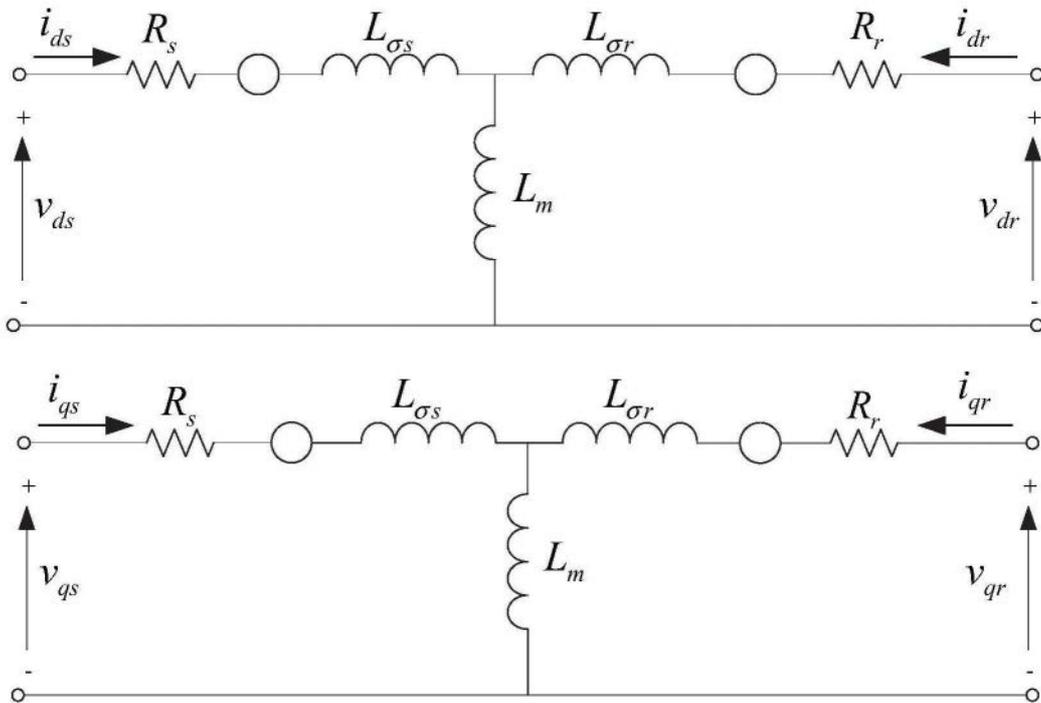


图2

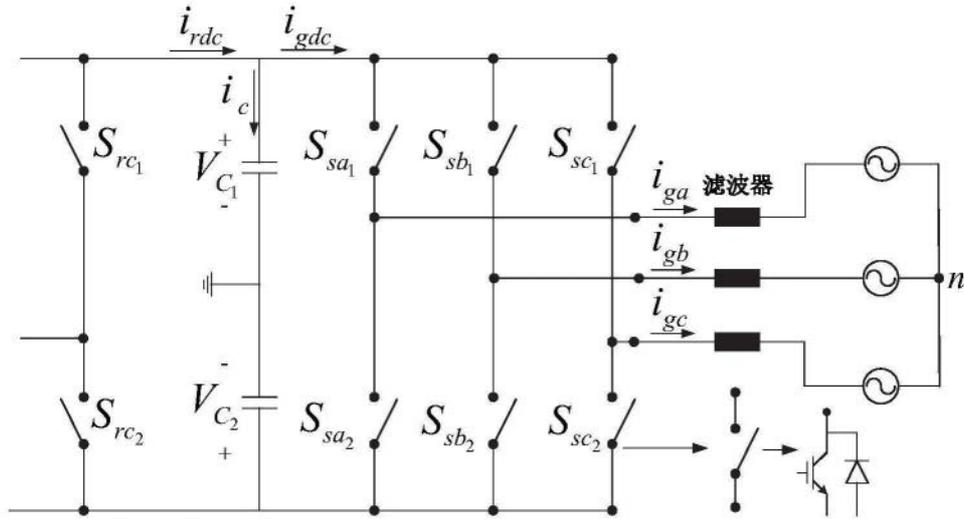


图3

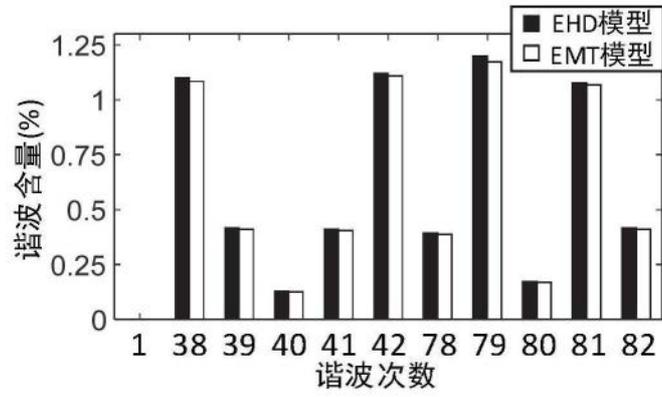


图4

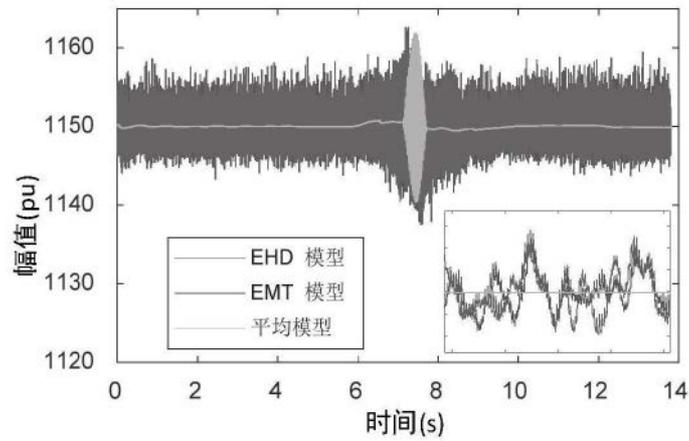


图5

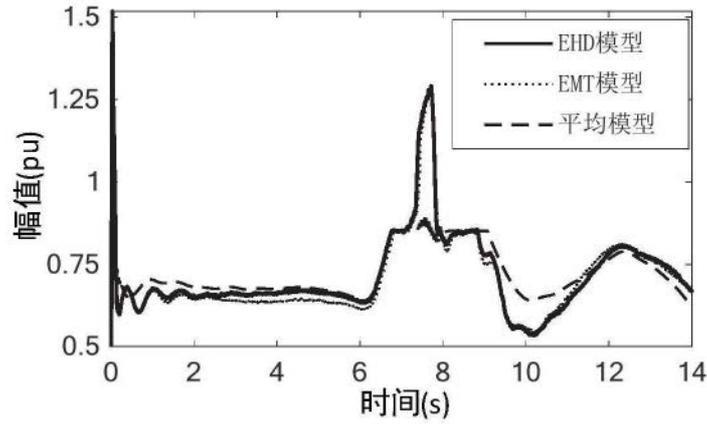


图6

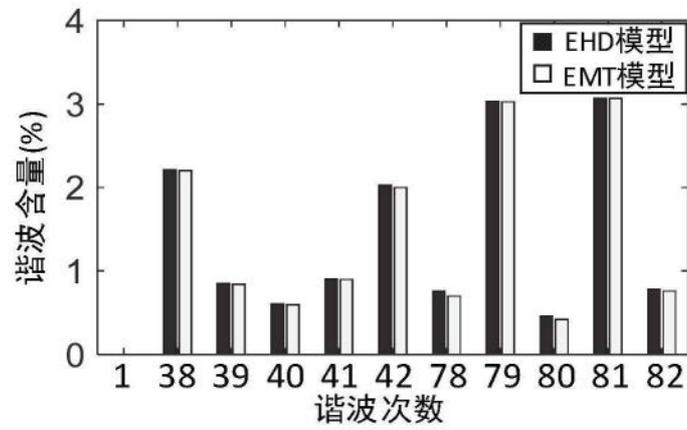


图7

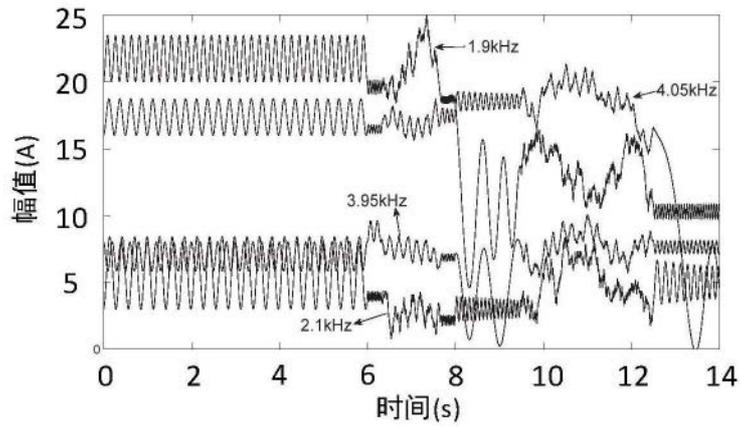


图8