



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110504706 B

(45) 授权公告日 2021.05.04

(21) 申请号 201910662468.X
 (22) 申请日 2019.07.22
 (65) 同一申请的已公布的文献号
 申请公布号 CN 110504706 A
 (43) 申请公布日 2019.11.26
 (73) 专利权人 中国农业大学
 地址 100193 北京市海淀区圆明园西路2号
 专利权人 华北电力科学研究院有限责任公司
 国网冀北电力有限公司电力科学研究院
 国网冀北电力有限公司
 国家电网有限公司
 (72) 发明人 巨云涛 高振 雷为民 赵峰
 刘辉 孙大卫 程雪坤
 (74) 专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司 11002
 代理人 程琛

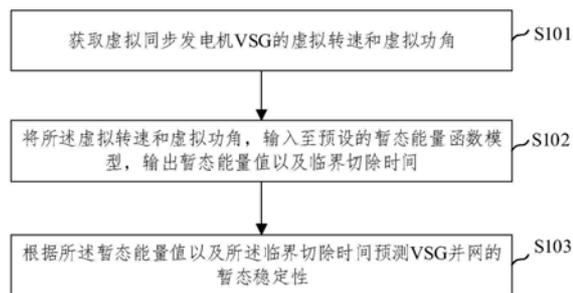
(51) Int.Cl.
 H02J 3/38 (2006.01)
 H02J 3/40 (2006.01)
 H02J 3/24 (2006.01)
 (56) 对比文件
 CN 109659930 A, 2019.04.19
 CN 106294993 A, 2017.01.04
 CN 108493984 A, 2018.09.04
 CN 107330193 A, 2017.11.07
 孙震宇.VSG策略下计及逆变器饱和的风电系统的暂态稳定分析方法研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技II辑》.2017,
 J Alipoor.Power System Stabilization Using Virtual Synchronous Generator With Alternating Moment of Inertia.《Emerging Selected Topics in Power Electronics》.2015,
 审查员 郭利娜
 权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置

(57) 摘要

本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置,所述方法包括:获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置,构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数,并计及虚拟阻尼的影响,建立的暂态能量函数准确度很高,通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测,计算量小,使用方便,预测效率高。



1. 一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法,其特征在于,包括:

获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;

根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性;

其中,获取所述暂态能量函数模型的具体步骤如下:根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数;先对初始暂态能量函数对时间求导,然后进行时间积分,计及虚拟阻尼的影响,得到所述暂态能量函数模型;

所述暂态能量函数模型用公式表示如下:

$$E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

2. 根据权利要求1所述的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法,其特征在于,所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

3. 一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置,其特征在于,包括:

获取模块,用于获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

计算模块,用于将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;

预测模块,用于根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性;

模型构建模块,具体用于:根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数;先对初始暂态能量函数对时间求导,然后进行时间积分,计及虚拟阻尼的影响,得到所述暂态能量函数模型;

所述暂态能量函数模型用公式表示如下:

$$E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

4. 根据权利要求3所述的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置,其特征在于,所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

5. 一种电子设备,包括存储器、处理器,以及存储在所述存储器上并可在所述处理器上

运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述计算机程序时,实现如权利要求1至2任一项所述虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法的步骤。

6.一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,当所述计算机程序被处理器执行时,实现如权利要求1至2任一所述虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法的步骤。

虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及分布式发电技术领域,尤其涉及一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置。

背景技术

[0002] 虚拟同步发电机(VSG)技术近年来发展迅速,将逐渐成为未来新能源的发展方向,VSG技术的应用可能对系统原有稳定性问题造成影响或者引入新的稳定性问题。VSG技术主要是利用控制手段使新能源发电模拟传统同步发电机的特性,从而使新能源发电为电网提供必要的频率和电压支撑。虚拟同步机并网运行后,会对电力系统的稳定性问题产生一定的影响。一方面,VSG模拟了同步发电机的特性,势必引入类似于同步发电机的稳定性问题;另一方面,VSG底层由电力电子器件和相应的控制实现,兼有传统逆变器的部分特点。随着新能源在电网中渗透率的不断提高,深入研究VSG并网的稳定性成为了该技术继续发展的关键。

[0003] 现有技术中,采用时域仿真模拟的方法对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行分析。

[0004] 但是,现有技术中的方法,计算量很大,暂态稳定性的预测效率很低,不方便应用。

发明内容

[0005] 本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置,用于解决现有技术中暂态稳定性的预测效率低的技术问题。

[0006] 为了解决上述技术问题,一方面,本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法,包括:

[0007] 获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

[0008] 将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;

[0009] 根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0010] 进一步地,获取所述暂态能量函数模型的具体步骤如下:

[0011] 根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数;

[0012] 先对初始暂态能量函数对时间求导,然后进行时间积分,计及虚拟阻尼的影响,得到所述暂态能量函数模型。

[0013] 进一步地,所述暂态能量函数模型用公式表示如下:

$$[0014] \quad E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

[0015] 其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转

矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

[0016] 进一步地, 所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

[0017] 另一方面, 本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置, 包括:

[0018] 获取模块, 用于获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

[0019] 计算模块, 用于将所述虚拟转速和虚拟功角, 输入至预设的暂态能量函数模型, 输出暂态能量值以及临界切除时间;

[0020] 预测模块, 用于根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0021] 进一步地, 还包括模型构建模块, 具体用于:

[0022] 根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数;

[0023] 先对初始暂态能量函数对时间求导, 然后进行时间积分, 计及虚拟阻尼的影响, 得到所述暂态能量函数模型。

[0024] 进一步地, 所述暂态能量函数模型用公式表示如下:

$$[0025] \quad E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

[0026] 其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

[0027] 进一步地, 所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

[0028] 再一方面, 本发明实施例提供一种电子设备, 包括: 存储器、处理器, 以及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序, 所述处理器执行所述计算机程序时, 实现上述方法的步骤。

[0029] 又一方面, 本发明实施例提供一种非暂态计算机可读存储介质, 其上存储有计算机程序, 当所述计算机程序被处理器执行时, 实现上述方法的步骤。

[0030] 本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法及装置, 构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数, 并计及虚拟阻尼的影响, 建立的暂态能量函数准确度很高, 通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测, 计算量小, 使用方便, 预测效率高。

附图说明

[0031] 图1为本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法示意图;

[0032] 图2为本发明实施例提供的接有VSG的单机无穷大系统的示意图;

[0033] 图3为本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置示意图;

[0034] 图4为本发明实施例提供的电子设备的结构示意图。

具体实施方式

[0035] 为了使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0036] 图1为本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法示意图,如图1所示,本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法,其执行主体为虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置,该方法包括:

[0037] 步骤S101、获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角。

[0038] 具体来说,图2为本发明实施例提供的接有VSG的单机无穷大系统的示意图,如图2所示,首先构建出接有VSG的单机无穷大系统。在这个系统的基础上,采用首次积分法构建暂态能量函数表达式,并计及VSG虚拟阻尼的影响。

[0039] 在构建好暂态能量函数模型之后,获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速 ω 和虚拟功角 δ 。

[0040] 步骤S102、将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间。

[0041] 具体来说,获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速 ω 和虚拟功角 δ 之后,将虚拟同步发电机VSG的虚拟转速 ω 和虚拟功角 δ ,输入至预先构建好的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间。

[0042] 步骤S103、根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0043] 具体来说,在获取暂态能量值以及临界切除时间之后,根据暂态能量值以及临界切除时间对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行分析,对实际现场设计有指导作用,避免成本浪费。

[0044] 本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法,构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数,并计及虚拟阻尼的影响,建立的暂态能量函数准确度很高,通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测,计算量小,使用方便,预测效率高。

[0045] 基于上述任一实施例,进一步地,获取所述暂态能量函数模型的具体步骤如下:

[0046] 根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数;

[0047] 先对初始暂态能量函数对时间求导,然后进行时间积分,计及虚拟阻尼的影响,得到所述暂态能量函数模型。

[0048] 具体来说,构建暂态能量函数模型的具体步骤如下:

[0049] 基于图2中建出的接有VSG的单机无穷大系统,可得VSG的系统运动方程如公式(1)所示。

$$[0050] \quad \begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_p(\omega - \omega_b) \end{cases} \quad (1)$$

[0051] 其中, δ 表示VSG的虚拟功角, t 表示时间, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, J 表示VSG的虚拟惯量, T_m 表示VSG的参考转矩, T_e 表示VSG的电磁转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼。

[0052] 基于公式(1), 可得忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程如公式(2)所示。

$$[0053] \quad \begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (2)$$

[0054] 令上式为:

$$[0055] \quad \begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b = f_1 \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e = f_2 \end{cases} \quad (3)$$

[0056] 上式有 $\frac{\partial f_1}{\partial \delta} + \frac{\partial f_2}{\partial \omega} = 0$, 系统具有首次积分, 根据公式(2)可得公式(4)。

$$[0057] \quad E = \frac{1}{2} J (\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V [\cos \delta - \cos \delta_s]}{X_\Sigma \omega_b} - T_m (\delta - \delta_s) \quad (4)$$

[0058] 其中, E 表示初始暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, X_Σ 为故障切除后系统的视在电抗, T_m 表示VSG的参考转矩。

[0059] 暂态能量函数对时间的导数如公式(5)。

$$[0060] \quad \frac{dE}{dt} = -D_p (\omega - \omega_b)^2 \quad (5)$$

[0061] 对公式(5)在 $[0, t]$ 进行积分并结合式(4), 可得公式(6)。

$$[0062] \quad E = \frac{1}{2} J (\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V [\cos \delta - \cos \delta_s]}{X_\Sigma \omega_b} - T_m (\delta - \delta_s) + \int_0^t D_p (\omega - \omega_b)^2 dt \quad (6)$$

[0063] 对VSG的系统运动方程的第二式, 左右两边同乘以 $\Delta \delta = (\delta - \delta_s)$, 并在 $[0, t]$ 进行积分可得公式(7)。

$$[0064] \quad \int_0^t J \frac{d\omega}{dt} \Delta \delta dt + \int_0^t D_p (\omega - \omega_b) \Delta \delta dt = \int_0^t (T_m - T_e) \Delta \delta dt \quad (7)$$

[0065] 对公式(7)左边第一项进行变形, 得到公式(8)。

$$[0066] \quad \int_0^t J \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} \Delta \delta dt = J \frac{d\Delta \delta}{dt} \Delta \delta \Big|_0^t - \int_0^t J \left(\frac{d\Delta \delta}{dt} \right)^2 dt = J (\omega - \omega_b) \Delta \delta - J \int_0^t (\omega - \omega_b)^2 dt \quad (8)$$

[0067] 将公式(8)带入到公式(7), 可得到公式(9)。

$$[0068] \quad \int_0^t (\omega - \omega_b)^2 dt = (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{1}{2J} D_p \Delta \delta^2 - \frac{1}{J} \int_0^t (T_m - T_e) \Delta \delta dt \quad (9)$$

[0069] 由此, 得到接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数模型如公式(10)。

$$[0070] \quad E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

[0071] 其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$, $\omega_b = 2\pi f_n$, f_n 表示系统频率。

[0072] 最后, 根据时域仿真的结果和暂态能量函数进行对比, 验证暂态能量函数的准确性, 并求出临界切除时间。

[0073] 本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法, 构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数, 并计及虚拟阻尼的影响, 建立的暂态能量函数准确度很高, 通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测, 计算量小, 使用方便, 预测效率高。

[0074] 基于上述任一实施例, 进一步地, 所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

[0075] 具体来说, 暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

[0076] 暂态能量函数模型用公式表示如下:

$$[0077] \quad E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

[0078] 其中, $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数, J 表示VSG的虚拟惯量, ω 表示VSG的虚拟转速, ω_b 表示系统转速, V_{VSG} 表示VSG的内电势, X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗, V 表示无穷大节点的电压, δ 表示VSG的虚拟功角, δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角, T_m 表示VSG的参考转矩, D_p 表示VSG的虚拟阻尼, λ 表示微调系数, $0 < \lambda < 1$, $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

[0079] 上述式子中, 第一项表示VSG虚拟转子动能, 第二项表示磁性势能和耗散势能, 第三项表示位置势能, 第四项和第五项表示虚拟阻尼消耗的能量。

[0080] 本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测方法, 构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数, 并计及虚拟阻尼的影响, 建立的暂态能量函数准确度很高, 通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测, 计算量小, 使用方便, 预测效率高。

[0081] 基于上述任一实施例, 图3为本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置示意图, 如图3所示, 本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置, 包括获取模块301、计算模块302和预测模块303, 其中:

[0082] 获取模块301用于获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角; 计算模块302用于将所述虚拟转速和虚拟功角, 输入至预设的暂态能量函数模型, 输出暂态能量值以及临界切除时间; 预测模块303用于根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0083] 基于上述任一实施例, 进一步地, 还包括模型构建模块, 具体用于:

[0084] 根据忽略虚拟阻尼影响的VSG系统运动方程求偏导得到初始暂态能量函数；

[0085] 先对初始暂态能量函数对时间求导，然后进行时间积分，计及虚拟阻尼的影响，得到所述暂态能量函数模型。

[0086] 基于上述任一实施例，进一步地，所述暂态能量函数模型用公式表示如下：

$$[0087] \quad E(\delta, \omega) = \frac{1}{2} J(\omega - \omega_b)^2 - \frac{V_{VSG} V}{X_{\Sigma} \omega_b} [\cos \delta - \cos \delta_s] - T_m \Delta \delta + D_p \lambda (\omega - \omega_b) \Delta \delta + \frac{D_p^2}{2J} \lambda \Delta \delta^2$$

[0088] 其中， $E(\delta, \omega)$ 表示暂态能量函数， J 表示VSG的虚拟惯量， ω 表示VSG的虚拟转速， ω_b 表示系统转速， V_{VSG} 表示VSG的内电势， X_{Σ} 表示故障切除后系统的视在电抗， V 表示无穷大节点的电压， δ 表示VSG的虚拟功角， δ_s 表示系统稳定平衡点处的功角， T_m 表示VSG的参考转矩， D_p 表示VSG的虚拟阻尼， λ 表示微调系数， $0 < \lambda < 1$ ， $\Delta \delta = \delta - \delta_s$ 。

[0089] 基于上述任一实施例，进一步地，所述暂态能量函数模型中包括虚拟转子动能、磁性势能、耗散势能、位置势能和虚拟阻尼消耗的能量。

[0090] 本发明实施例提供一种虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置，用于执行上述任一实施例中所述的方法，通过本实施例提供的装置执行上述某一实施例中所述的方法的具体步骤与上述相应实施例相同，此处不再赘述。

[0091] 本发明实施例提供的虚拟同步发电机并网的暂态稳定性预测装置，构建接有VSG的单机无穷大系统的暂态能量函数，并计及虚拟阻尼的影响，建立的暂态能量函数准确度很高，通过计算暂态能量函数对虚拟同步发电机并网的暂态稳定性进行预测，计算量小，使用方便，预测效率高。

[0092] 图4为本发明实施例提供的电子设备的结构示意图，如图4所示，所述设备包括：处理器 (processor) 401、存储器 (memory) 402、总线403，以及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序。

[0093] 其中，处理器401和存储器402通过总线403完成相互间的通信；

[0094] 处理器401用于调用并执行存储器402中的计算机程序，以执行上述各方法实施例中的步骤，例如包括：

[0095] 获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角；

[0096] 将所述虚拟转速和虚拟功角，输入至预设的暂态能量函数模型，输出暂态能量值以及临界切除时间；

[0097] 根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0098] 此外，上述的存储器中的逻辑指令可以通过软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解，本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以使得一台计算机设备（可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等）执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U盘、移动硬盘、只读存储器 (ROM, Read-Only Memory)、随机存取存储器 (RAM, Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0099] 本发明实施例提供一种计算机程序产品，所述计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算机程序，所述计算机程序包括程序指令，当所述程序指令被

计算机执行时,计算机能够执行上述各方法实施例中的步骤,例如包括:

[0100] 获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

[0101] 将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;

[0102] 根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0103] 本发明实施例提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,当所述计算机程序被处理器执行时,实现上述各方法实施例中的步骤,例如包括:

[0104] 获取虚拟同步发电机VSG的虚拟转速和虚拟功角;

[0105] 将所述虚拟转速和虚拟功角,输入至预设的暂态能量函数模型,输出暂态能量值以及临界切除时间;

[0106] 根据所述暂态能量值以及所述临界切除时间预测VSG并网的暂态稳定性。

[0107] 以上所描述的装置及设备实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0108] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0109] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

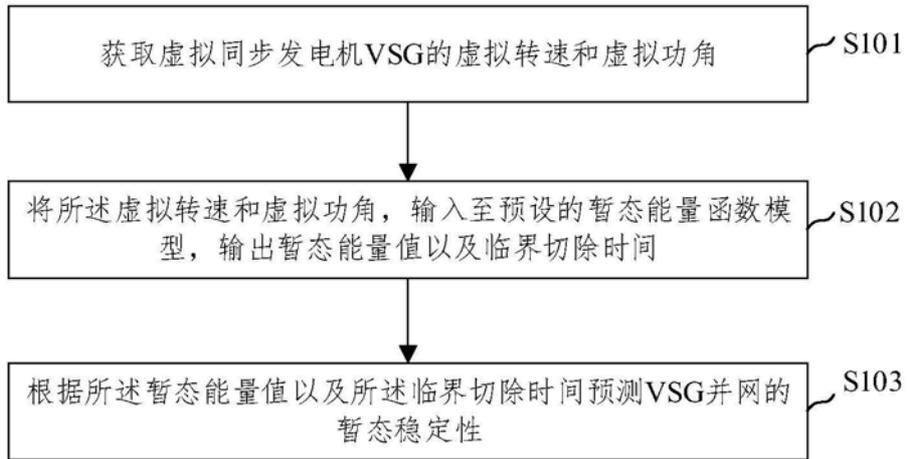


图1

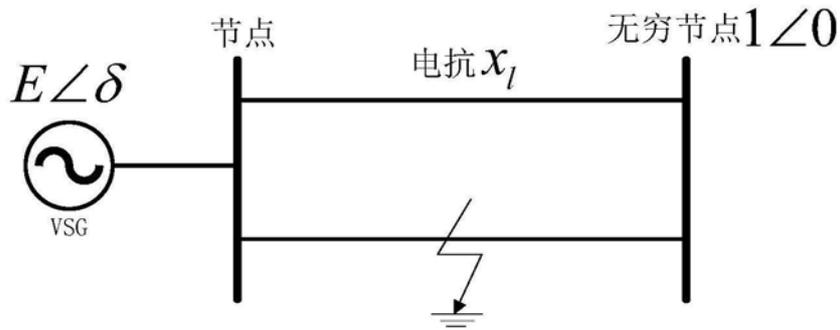


图2



图3

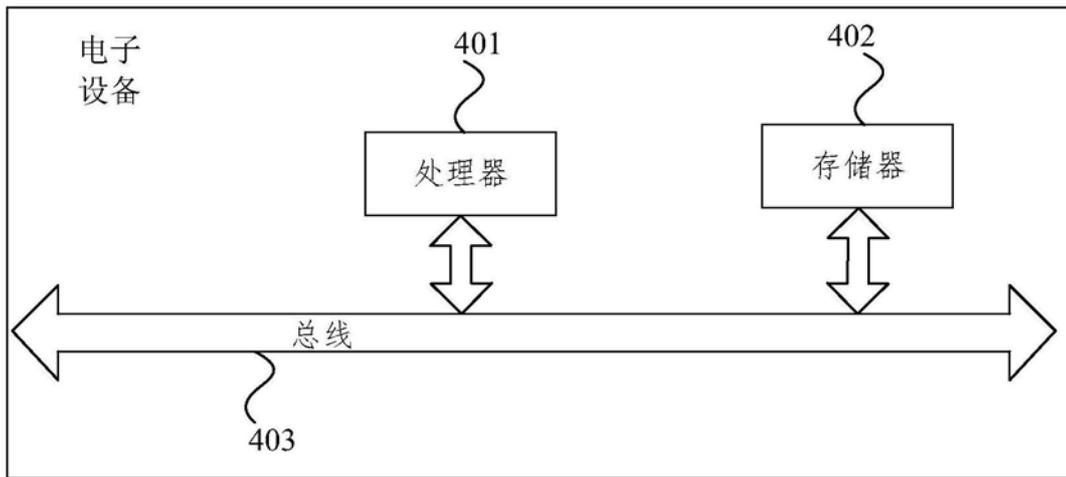


图4