



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106021768 B

(45)授权公告日 2019.01.11

(21)申请号 201610371147.0

(22)申请日 2016.05.30

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106021768 A

(43)申请公布日 2016.10.12

(73)专利权人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72)发明人 王慧芳 姜宽 林达 何奔腾

(74)专利代理机构 杭州求是专利事务所有限公司

33200

代理人 忻明年

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 104283217 A,2015.01.14,

CN 103870649 A,2014.06.18,

CN 103049617 A,2013.04.17,

WO 2012012897 A1,2012.02.02,

于浩 等.基于状态变量分析的有源配电网电磁暂态仿真自动建模方法.《电网技术》.2015,第39卷(第6期),1518-1524.

审查员 许哲

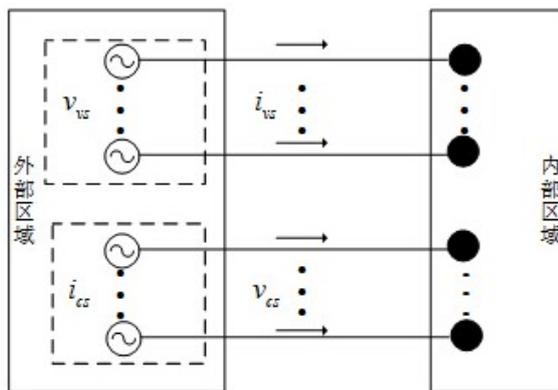
权利要求书6页 说明书9页 附图4页

(54)发明名称

含分布式电源接入的配电网简化建模方法

(57)摘要

本发明提出了含分布式电源接入的配电网简化建模方法。大规模分布式电源接入配电网，不仅分布式电源的非线性特征使得仿真计算速度受到很大限制，而且当配电网的节点、支路数较多时，网络矩阵维数的过高会进一步导致仿真计算速度下降。本发明将含分布式电源接入的配电网划分为内部线性区域和外部非线性区域，将配电网网架部分与分布式电源分别进行简化处理，得到含分布式电源接入的配电网新建模方法，可准确地模拟系统的动态过程，大大提升系统的仿真速度。该建模方法保证了仿真的准确性和快速性，为大规模分布式电源接入配电网的快速仿真提供了新技术。



1. 含分布式电源接入的配电网简化建模方法,其特征在于:

将含分布式电源的配电网分为两个区域:内部线性区域,即配电网网架部分;外部非线性区域,即分布式电源部分;

内部区域主要是由系统元件组成,包括线路、变压器,将负荷视作恒阻抗负荷;外部非线性分布式电源假设采用恒功率控制方式,以最大可能输出有功功率;先对内部线性的配电网网架区域推导以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程,并采用降阶方法实现线性系统的简化处理,在不改变系统的输入输出个数的情况下减少状态方程中的状态量数量,得到降阶后的配电网状态空间方程;对外部分布式电源区域建立微分代数方程,得到分布式电源的状态空间方程;并且用动态相量法提取内部线性区域以及外部非线性区域状态空间方程的主要频率特征量;最后以网络接口的形式对接,对整个系统进行互联,建立含分布式电源接入的配电网新仿真模型;

具体步骤如下:

步骤1),将含分布式电源接入的配电网划分成内部、外部区域;

将含分布式电源接入的配电网划分为两个区域,一个是以线性的配电网网架部分为对象的内部区域和以非线性的分布式电源为对象的外部区域;

步骤2),对内部线性区域建立配电网网架部分的状态空间方程;

利用基本回路矩阵 B_b 表述配电网的基尔霍夫电流方程和基尔霍夫电压方程,如下式所示:

$$B_b v_{br} = 0$$

$$B_b^T i_x = i_{br}$$

其中 i_{br} 为支路电流向量, v_{br} 为支路电压向量, i_x 为基本回路电流向量,基本回路矩阵 B_b 由系统初始的节点关联矩阵推导得到;

采用ASMG方法中提出的一般支路模型, i_k 和 j_k 分别代表第 k 条支路的支路电流和电流源电流;对于系统中的所有支路将伏安关系写成向量形式:

$$v_{br} = R_{br} i_{br} + L_{br} p i_{br} + P_{br} q_{br} + e_{br}$$

其中, P_{br} 主对角线元素为相应支路电容的倒数,若该支路不存在电容则对应位置为0; p 为微分算子; $q_{br} = \frac{1}{p}(i_{br} + j_{br})$, j_{br} 为支路电流源电流向量; L_{br} 是支路电感矩阵,其主对角线元素表示相应支路的自感,非主对角线元素表示对应支路的互感; R_{br} 是支路电阻矩阵, e_{br} 为支路电压源电压向量;

为了让输入系统的电压量和电流量与一般支路模型对应,定义相应的关联矩阵 $W_1 \in R^{n_{vs} \times n_{br}}$, $W_2 \in R^{n_{cs} \times n_{br}}$,其中 n_{vs} 、 n_{cs} 分别表示电压、电流输入量的个数, n_{br} 表示网络中支路个数;当第 r 个电压输入量位于支路 k 上时,则 $W_1(r, k) = 1$,否则 $W_1(r, k) = 0$; W_2 采用类似方式定义,即当第 r 个电流输入量位于支路 k 上时,则 $W_2(r, k) = 1$,否则 $W_2(r, k) = 0$;可得输入量与支路量的对应关系为:

$$e_{br} = W_1^T v_{vs}$$

$$j_{br} = W_2^T i_{cs}$$

其中 e_{br} 为支路电压源电压向量, j_{br} 为支路电流源电流向量, v_{vs} 为输入电压向量, i_{cs} 为

输入电流向量；

对于配电网来说,分布式电源的输入量为电流量;将模型输入量定义为两种类型,即电压输入端子和电流输入端子;结合实际情况,定义电压输入端子电流 i_{cs} 与电流输入端子电压 v_{vs} 为模型输出量,可以得到以基本回路电流 i_x 和电容电压 v_c 为状态变量的配电网状态空间方程如下式:

$$\begin{bmatrix} B_b L_{br} B_b^T & 0 \\ 0 & M^T C_{br} M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_x \\ \dot{v}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_b R_{br} B_b^T & B_b M \\ -M^T B_b^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B_b W_1^T & 0 \\ 0 & M^T W_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{vs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{vs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_1 B_b^T & 0 \\ 0 & W_2 M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ v_c \end{bmatrix}$$

其中 i_x 为基本回路电流向量, v_c 为支路电容电压向量, C_{br} 为支路电容矩阵,支路电容关联矩阵 $M \in \mathbb{R}^{n_{br} \times n_c}$, n_c 表示网络中电容个数, n_{br} 表示网络中支路个数,取值方式与 W_1 和 W_2 相同;对照标准状态方程式:

$$C\dot{x} + Gx = Bu$$

$$y = L^T x$$

可得标准状态方程对应的系数矩阵表达式如下:

$$C = \begin{bmatrix} B_b L_{br} B_b^T & 0 \\ 0 & M^T C_{br} M \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} B_b R_{br} B_b^T & B_b M \\ -M^T B_b^T & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -B_b W_1^T & 0 \\ 0 & M^T W_2^T \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -B_b W_1^T & 0 \\ 0 & M^T W_2^T \end{bmatrix}$$

步骤3),对配电网网架部分的状态空间方程降阶,求取其降阶后的状态空间方程,

在建立完内部配电网架部分的状态空间方程后,对模型进行降阶处理;以下为具体降阶方法:

假设某个线性时不变的动态系统:

$$E \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$y(t) = B^T x(t)$$

计算得到该系统的拉普拉斯域下的传递函数如下:

$$H(s) = B^T (s_0 E - A + (s - s_0) E)^{-1} B$$

$$= B^T (I + (s - s_0) M)^{-1} R$$

其中

$$M := (s_0 E - A)^{-1} E, R := (s_0 E - A)^{-1} B$$

n 阶Krylov子空间可以通过下面得到:

$$k_n(M, R) = \text{colspan}[R \ MR \ M^2 R \ \cdots \ M^{n-1} R]$$

进而得到空间的正交特征向量 V_n :

$$\text{colspan} V_n = k_n(M, R)$$

再利用SPRIM算法,获取特征矩阵 \hat{V} :

$$\kappa_n(M, R) \subseteq \text{colspan } \hat{V}$$

将 V_n 根据状态变量中的电压、电流量拆分为子向量 \hat{V}_1 和 \hat{V}_2 ,其中 \hat{V}_1 、 \hat{V}_2 分别代表状态变量中的电压和电流量,利用 \hat{V}_1 和 \hat{V}_2 可以构造得到特征矩阵 \hat{V}

$$V_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix}, \hat{V} = \begin{bmatrix} \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2 \end{bmatrix}$$

则以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程可以变换为下面降阶后的状态空间方程:

$$C_n \dot{x}_n + G_n x_n = B_n u$$

$$y = L_n^T x_n$$

其中,上式方程加下标n表示降阶后的状态空间方程,该方程矩阵的阶数小于降阶前的系统;上述状态方程对应的系数矩阵表达式如下:

$$C_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1^T B_b L_{br} B_b^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T C_{br} M \hat{V}_2 \end{bmatrix}, G_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1^T B_b R_{br} B_b^T \hat{V}_1 & \hat{V}_1^T B_b M \hat{V}_2 \\ -\hat{V}_2^T M^T B_b^T \hat{V}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_n = \begin{bmatrix} -\hat{V}_1^T B_b W_1^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T W_2^T \hat{V}_2 \end{bmatrix}, L_n = \begin{bmatrix} -\hat{V}_1^T B_b W_1^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T W_2^T \hat{V}_2 \end{bmatrix}$$

步骤4),对外部非线性区域建立分布式电源的状态空间方程;

对于外部非线性区域的分布式电源,它由三个子模块组成:功率控制、电流控制以及网侧滤波器,分别建立其状态空间方程;

对于功率控制,假设分布式电源采用恒功率控制策略,即PQ控制,瞬时有功功率p和无功功率q由下式计算得到:

$$p = v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq}$$

$$q = v_{od} i_{oq} - v_{oq} i_{od}$$

其中 v_{od} 、 i_{od} 、 v_{oq} 、 i_{oq} 分别为电网电压、电流在两相同步旋转坐标系dq下的d轴电压、电流和q轴电压、电流;

功率控制利用PI调节,则对应的状态方程如下:

$$\frac{d\phi_p}{dt} = P_{ref} - p, \quad \frac{d\phi_q}{dt} = Q_{ref} - q$$

以及代数方程为:

$$i_{od}^* = K_p (P_{ref} - p) + K_i \phi_p$$

$$i_{oq}^* = K_p (Q_{ref} - q) + K_i \phi_q$$

其中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别是有功、无功功率指令, ϕ_p 和 ϕ_q 是状态变量, i_{od}^* 和 i_{oq}^* 为电流控制的输入参考值, K_p 和 K_i 分别是功率控制中的比例调节增益和积分调节增益;

则功率控制的状态空间方程可列写如下,方程的输入量为参考功率和反馈功率:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} + B_p \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} + B_v \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} = C_v \begin{bmatrix} \varphi_{dq} \end{bmatrix} + D_{v1} \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} + D_{v2} \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix}$$

其中：

$$B_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, C_v = \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_i \end{bmatrix}, D_{v1} = \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & K_p \end{bmatrix}, D_{v2} = \begin{bmatrix} -K_p & 0 \\ 0 & -K_p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_d & \varphi_q \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ref} & Q_{ref} \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & q \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{od}^* & i_{oq}^* \end{bmatrix}^T$$

对于电流控制,对应状态方程为:

$$\frac{d\phi_d}{dt} = i_{od}^* - i_{od}, \frac{d\phi_q}{dt} = i_{oq}^* - i_{oq}$$

以及代数方程为:

$$v_{id}^* = K_{pv} (i_{od}^* - i_{od}) + K_{iv} \phi_d - \omega L_c i_{oq} + v_{od}$$

$$v_{iq}^* = K_{pv} (i_{oq}^* - i_{oq}) + K_{iv} \phi_q + \omega L_c i_{od} + v_{oq}$$

其中, ϕ_d 和 ϕ_q 是状态变量, v_{id}^* 和 v_{iq}^* 电流控制的输出参考值, ω 为电网角频率, L_c 为逆变器出口侧滤波电感的大小, K_{pv} 和 K_{iv} 分别是电流控制中的比例调节增益和积分调节增益;

则电流控制的状态空间方程可列写如下,方程的输入量为参考电流和反馈电流:

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} + B_{i1} \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} + B_{i2} \begin{bmatrix} i_{odq} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{idq}^* \end{bmatrix} = C_i \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} + D_{i1} \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} + D_{i2} \begin{bmatrix} v_{odq} \end{bmatrix} + D_{i3} \begin{bmatrix} i_{odq} \end{bmatrix}$$

其中:

$$B_{i1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{i2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} K_{iv} & 0 \\ 0 & K_{iv} \end{bmatrix}, D_{i1} = \begin{bmatrix} K_{pv} & 0 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}, D_{i2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D_{i3} = \begin{bmatrix} -K_{pv} & -\omega L \\ \omega L & -K_{pv} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_d & \varphi_q \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{od}^* & i_{oq}^* \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} i_{odq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{od} & i_{oq} \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} v_{odq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{od} & v_{oq} \end{bmatrix}^T$$

对于网侧滤波器,在假设逆变器实际提供输出电压 v_{id} 、 v_{iq} 等于指令电压 v_{id}^* 、 v_{iq}^* ($v_{id} = v_{id}^*$, $v_{iq} = v_{iq}^*$)的情况下,滤波器模型可列写如下:

$$L_c \frac{di_{od}}{dt} = \omega L_c i_{oq} + v_{id} - v_{od}$$

$$L_c \frac{di_{oq}}{dt} = -\omega L_c i_{od} + v_{iq} - v_{oq}$$

则网侧滤波器的状态空间方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{odq} \end{bmatrix} = A_L \begin{bmatrix} i_{odq} \end{bmatrix} + B_{L1} \begin{bmatrix} v_{idq} \end{bmatrix} + B_{L2} \begin{bmatrix} v_{odq} \end{bmatrix}$$

其中:

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, B_{L1} = \begin{bmatrix} 1/L_c & 0 \\ 0 & 1/L_c \end{bmatrix}, B_{L2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{odq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{od} & i_{oq} \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} v_{idq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{id} & v_{iq} \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} v_{odq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{od} & v_{oq} \end{bmatrix}^T$$

将上述功率控制、电流控制、网侧滤波器的状态空间方程整理合并,得到整个分布式电

源的状态空间方程：

$$[\dot{\mathbf{x}}_{DG}] = \mathbf{A}_v [\mathbf{x}_{DG}] + \mathbf{B}_{v1} [\mathbf{v}_{odq}] + \mathbf{B}_{v2} [PQ_{ref}]$$

$$[i_{dq}] = C_t [x_{DG}]$$

其中：

$$\mathbf{x}_{DG} = [\varphi_{dq} \quad \phi_{dq} \quad i_{dq}]$$

$$\mathbf{A}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_v S \\ B_{i1} C_v & 0 & B_{i1} D_{v2} S + B_{i2} \\ B_{L1} D_{i1} C_v & B_{L1} C_i & A_L + B_{L1} D_{i3} + B_{L1} D_{i1} D_{v2} S \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{v1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{L1} D_{i2} + B_{L2} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{v2} = \begin{bmatrix} B_p \\ B_{i1} D_{v1} \\ B_{L1} D_{i1} D_{v1} \end{bmatrix}$$

$$C_i = [0 \quad 0 \quad I], S = \begin{bmatrix} v_{od} & v_{oq} \\ -v_{oq} & v_{od} \end{bmatrix}$$

步骤5)，对内部、外部区域的状态空间方程进行动态相量建模，

运用基于信号调制理论的动态相量模型，即对时域内周期为T的信号选择宽度为T的时间窗内的主要傅立叶系数，对配电网内部区域的以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程以及外部区域的分布式电源状态空间方程改写成动态相量的表达形式，分别计算如下：

$$C_n \left\langle \frac{d\mathbf{x}_n}{dt} \right\rangle_k + \mathbf{G}_n \langle \mathbf{x}_n \rangle_k = C_n \left(\frac{d\langle \mathbf{x}_n \rangle_k}{dt} + jk\omega \langle \mathbf{x}_n \rangle_k \right) + \mathbf{G}_n \langle \mathbf{x}_n \rangle_k = \mathbf{B}_n \langle \mathbf{u} \rangle_k$$

$$\langle \mathbf{y} \rangle_k = \mathbf{L}_n^T \langle \mathbf{x}_n \rangle_k$$

$$\left\langle \frac{d\mathbf{x}_{DG}}{dt} \right\rangle_k = \frac{d\langle \mathbf{x}_{DG} \rangle_k}{dt} + jk\omega \langle \mathbf{x}_{DG} \rangle_k = \mathbf{A}_v \langle \mathbf{x}_{DG} \rangle_k + \mathbf{B}_{v1} \langle \mathbf{v}_{dq} \rangle_k + \mathbf{B}_{v2} \langle PQ_{ref} \rangle_k$$

$$\langle i_{dq} \rangle_k = C_t \langle x_{DG} \rangle_k$$

其中， $\langle \cdot \rangle_k$ 代表相关变量的k阶动态相量；

由于上述分布式电源的控制均是基于dq0坐标系，则将分布式电源的动态相量模型转换为abc坐标系以实现内部区域与外部区域的互联，转换关系满足以下方程：

$$\langle f_D \rangle_k = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_p \rangle_{k+1} + \langle f_n \rangle_{k-1}), \langle f_Q \rangle_k = \frac{j}{\sqrt{2}} (\langle f_p \rangle_{k+1} - \langle f_n \rangle_{k-1})$$

$$\langle f_p \rangle_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_D \rangle_k - j \langle f_Q \rangle_k), \langle f_n \rangle_{k-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_D \rangle_k + j \langle f_Q \rangle_k)$$

其中，f代表可能的电量参数，例如电压或电流，DQ代表同步旋转坐标系，p、n分别代表正序和负序；

步骤6)，内部、外部区域的动态相量模型互联，

将动态相量表达形式的内部区域配电网状态空间方程和外部区域分布式电源状态空

间方程以网络接口的形式对接,即内部区域状态空间方程的输入量为外部区域状态空间方程的输出量和外接电压源的电压量,外部区域状态空间方程的输入量为内部区域状态空间方程的输出量。

含分布式电源接入的配电网简化建模方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力系统领域,具体地说是含分布式电源接入的配电网简化建模方法。

背景技术

[0002] 随着经济社会的不断发展,能源消耗不断增加,不可再生资源逐渐枯竭,并且由此引发的雾霾等环境污染问题愈加严重,这直接促使发展新能源成为各国今后能源发展的战略需求。在此背景下,分布式电源(Distributed Generation, DG)近年来发展迅猛。然而大规模分布式电源接入传统配电网,会对配电网的电力电量平衡、电气设备经济运行、线路潮流、电压降落、电能损耗、电能质量、开关设备保护等情况产生重要影响,因此必须对含分布式电源接入的配电网进行建模仿真研究。

[0003] 含分布式电源接入的配电网可以分为线性的配电网网架部分以及非线性的分布式电源部分。对于线性的配电网网架部分,当配电网节点、支路数较多时,会由于其网络矩阵维数较高,导致直接进行分析相对困难或数值模拟耗时过长,模型的求解时间相当可观,因此对于大型或复杂的配电网系统,有必要寻求对模型的规模或阶数进行有效降阶的方法,减少数据运算量,达到减少仿真耗时的目的。而非线性的分布式电源,由于含有大量非线性特征的电力电子器件及其控制器,仿真计算速度受到很大限制,当分布式电源大规模接入配电网时,现有的仿真技术手段会使仿真耗时过长,甚至无法进行,因此对于分布式电源,也有必要探索在不牺牲仿真精度情况下加快仿真速度、减少计算量的方法,为此可对分布式电源进行简化建模。当线性的配电网网架部分以及非线性的分布式电源模型建立后,两种仿真技术的合成也需要研究。

发明内容

[0004] 本发明所要解决的技术问题是克服上述现有技术存在的缺陷,提供一种含分布式电源接入的配电网简化建模方法,该方法将配电网线性网架部分与含非线性特征的分布式电源分别进行简化处理,得到含分布式电源接入的配电网新仿真模型,可准确模拟系统的动态过程,大大提升系统的仿真速度。

[0005] 为此,本发明采用如下的技术方案:将含分布式电源的配电网分为两个区域:1)内部线性区域,即配电网网架部分;2)外部非线性区域,即分布式电源部分。内部区域主要是由系统元件组成,包括线路、变压器,将负荷视作恒阻抗负荷。外部非线性分布式电源假设采用恒功率控制方式,以最大可能输出有功功率。先对内部线性的配电网网架区域推导以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程,并采用降阶方法实现线性系统的简化处理,在不改变系统的输入输出个数的情况下减少状态方程中的状态量数量,得到降阶后的配电网状态空间方程;对外部分布式电源区域建立微分代数方程,得到分布式电源的状态空间方程;并且用动态相量法提取内部线性区域以及外部非线性区域状态空间方程的主要频率特征量;最后以网络接口的形式对接,对整个系统进行互联,建立含分布式

电源接入的配电网新仿真模型。

[0006] 本发明的有益效果是:本发明充分考虑了含分布式电源配电网的特点,根据配电网中元件的线性和非线性特征,将配电网划分为两个研究区域分别进行处理,提供了一种配电网简化建模方法,降低了模型复杂度,加快了仿真速度。该简化建模方法保证了仿真的准确性和快速性,为大规模分布式电源接入配电网的快速仿真奠定了基础。

[0007] 本发明采用以下具体步骤:

[0008] 步骤1),将含分布式电源接入的配电网划分成内部、外部研究区域;

[0009] 将含分布式电源接入的配电网划分为两个区域,一个是以线性的配电网网架部分为对象的内部区域和以非线性的分布式电源为对象的外部区域。

[0010] 步骤2),对内部线性区域建立配电网网架部分的状态空间方程;

[0011] 在对内部线性区域的建模中,由系统初始的节点关联矩阵推导配电网的基本回路矩阵,再利用基本回路矩阵得到配电网的基尔霍夫电流方程(KCL)、基尔霍夫电压方程(KVL)。采用ASMG方法中提出的一般支路模型,将系统中所有支路的伏安关系写成相量形式。定义相应的关联矩阵,使输入系统的电压量和电流量与一般支路模型对应,得到输入量与支路量的对应关系。对于配电网,分布式电源的输入量为电流量,将模型输入量定义为两种类型:电压输入端子和电流输入端子,并定义电压输入端子电流与电流输入端子电压为模型输出量,建立系统状态方程与输出方程,进而得到以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程,并对照标准状态方程式,得到对应的系数矩阵表达式。

[0012] 步骤3),对配电网网架部分的状态空间方程降阶,求取其降阶后的状态空间方程;

[0013] 在建立完配电网网架部分的状态空间方程后,对于线性系统,采用模型降阶处理方法,对模型进行降阶。即,对线性非时变的动态系统,根据其状态空间方程,计算该系统的拉普拉斯域下的传递函数,得到Krylov子空间以及子空间的正交特征向量。再利用SPRIM算法获取特征矩阵,即将子空间的正交特征向量拆分为子向量,进而由以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程得到降阶后的状态空间方程。

[0014] 步骤4),对外部非线性区域建立分布式电源的状态空间方程;

[0015] 对于外部非线性的分布式电源,假设逆变器型分布式电源采用PQ控制策略。在功率控制中,计算分布式电源的瞬时有功和无功功率,功率控制利用PI调节,分别列写功率PI调节的状态方程及代数方程,进而得到以电流环电流指令值为输出的功率PI调节的状态空间方程;电流控制也利用PI调节,分别列写电流PI调节的状态方程及代数方程,进而得到以逆变器出口电压指令值为输出的电流PI调节的状态空间方程;对于网侧滤波器,列写以电网侧电流为输出的状态方程,进而得到其状态空间方程。之后,将上述功率控制、电流控制、网侧滤波器的状态空间方程整理合并,得到整个分布式电源的状态空间方程。

[0016] 步骤5),对内部、外部区域的状态空间方程进行动态相量建模;

[0017] 运用基于信号调制理论的动态相量模型,即对时域内周期为T的信号选择宽度为T的时间窗内的主要傅立叶系数,将配电网内部区域的配电网状态空间方程以及外部区域的分布式电源状态空间方程改写成动态相量的表达形式,对原始波形作近似的估计,进一步降低模型的复杂度。由于上述分布式电源的控制均是基于dq0坐标系,进一步将分布式电源的动态相量模型转换到abc坐标系下以实现内部区域与外部区域的互联。

[0018] 步骤6),内部、外部区域的动态相量模型互联;

[0019] 将动态相量表达形式的内部区域的配电网状态空间方程和外部区域的分布式电源状态空间方程以网络接口的形式对接,即内部区域状态空间方程的输入量为外部区域状态空间方程的输出量和外部电源的电压量,外部区域状态空间方程的输入量为内部区域状态空间方程的输出量。

[0020] 本发明提出了一种含分布式电源接入配电网的新简化建模方法,可加快仿真速度,减少仿真耗时。利用本发明提出的含分布式电源接入配电网的简化建模方法,可推广应用用于分布式电源高渗透的大型配电网系统的技术验证和分析。

附图说明

[0021] 图1为含分布式电源接入配电网的内外区域划分图。

[0022] 图2为配电网一般支路模型。

[0023] 图3为分布式电源的控制框图。

[0024] 图4为IEEE34节点配电网系统接线图。

[0025] 图5a为功率指令为0.5MW时大电源接入处的电流 I_s 以及DG接入处的电流 I_{dg} 波形图。

[0026] 图5b为功率指令波动时大电源接入处的电流 I_s ,DG接入处的电流 I_{dg} 波形图。

[0027] 图5c为节点828发生三相接地短路故障时大电源接入处的电流 I_s 以及DG接入处的电流 I_{dg} 波形图。

具体实施方式

[0028] 以下结合附图对本发明作进一步说明,本发明包括以下步骤:

[0029] 根据配电网中元件的线性和非线性特征,将含分布式电源的配电网分为两个区域:1)内部线性区域,即配电网网架部分;2)外部非线性区域,即分布式电源部分,如图1所示,其中 v_{vs} 为外部电压源, i_{cs} 为外部电流源。内部区域主要是由系统元件组成,包括线路、变压器。在暂态建模过程中,将负荷视作恒阻抗负荷。同时,系统中分布式电源假设采用恒功率控制方式,以最大可能输出有功功率。因此由于分布式电源的控制作用,使得系统的外部区域呈现非线性特性。本发明先对内部线性的配电网网架部分推导以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程,并采用降阶方法实现线性系统的简化处理,在不改变系统输入输出个数的情况下减少状态方程中的状态变量数量,得到降阶后的配电网状态空间方程;对外部分布式电源区域建立微分代数方程,得到分布式电源的状态空间方程;并且用动态相量法提取其中的主要频率特征量;最后以网络接口的形式对接,对整个系统进行互联,建立含分布式电源接入的配电网新仿真模型。具体实施步骤如下:

[0030] 步骤1),将含分布式电源接入的配电网划分成内部、外部研究区域,

[0031] 将含分布式电源接入的配电网划分为两个区域,一个是以线性的配电网网架部分为对象的内部区域和以非线性的分布式电源为对象的外部区域。

[0032] 步骤2),对内部线性区域建立配电网网架部分的状态空间方程,

[0033] 利用基本回路矩阵 B_b 表述配电网网络的基尔霍夫电流方程(KCL)和基尔霍夫电压方程(KVL),如下式所示:

[0034] $B_b v_{br} = 0$

$$[0035] \quad \mathbf{B}_b^T \mathbf{i}_x = \mathbf{i}_{br}$$

[0036] 其中 \mathbf{i}_{br} 为支路电流向量； \mathbf{v}_{br} 为支路电压向量； \mathbf{i}_x 为基本回路电流向量。基本回路矩阵 \mathbf{B}_b 由系统初始的节点关联矩阵推导得到。

[0037] 采用ASMG方法中提出的一般支路模型，如图2所示。图中 i_k 和 j_k 分别代表第 k 条支路的支路电流和电流源电流。对于系统中的所有支路将伏安关系写成向量形式：

$$[0038] \quad \mathbf{v}_{br} = \mathbf{R}_{br} \mathbf{i}_{br} + \mathbf{L}_{br} p \mathbf{i}_{br} + \mathbf{P}_{br} \mathbf{q}_{br} + \mathbf{e}_{br}$$

[0039] 其中， \mathbf{P}_{br} 主对角线元素为相应支路电容的倒数，若该支路不存在电容则对应位置为0； p 为微分算子； $\mathbf{q}_{br} = \frac{1}{p}(\mathbf{i}_{br} + \mathbf{j}_{br})$ ， \mathbf{j}_{br} 为支路电流源电流向量； \mathbf{L}_{br} 是支路电感矩阵，其主对角线元素表示相应支路的自感，非主对角线元素表示对应支路的互感； \mathbf{R}_{br} 是支路电阻矩阵， \mathbf{e}_{br} 为支路电压源电压向量。

[0040] 为了让输入系统的电压量和电流与一般支路模型对应，定义相应的关联矩阵 $\mathbf{W}_1 \in \mathbb{R}^{n_{vs} \times n_{br}}$ ， $\mathbf{W}_2 \in \mathbb{R}^{n_{cs} \times n_{br}}$ ，其中 n_{vs} 、 n_{cs} 分别表示电压、电流输入量的个数， n_{br} 表示网络中支路个数。当第 r 个电压输入量位于支路 k 上时，则 $\mathbf{W}_1(r, k) = 1$ ，否则 $\mathbf{W}_1(r, k) = 0$ 。 \mathbf{W}_2 采用类似方式定义，即当第 r 个电流输入量位于支路 k 上时，则 $\mathbf{W}_2(r, k) = 1$ ，否则 $\mathbf{W}_2(r, k) = 0$ 。可得输入量与支路量的对应关系为：

$$[0041] \quad \mathbf{e}_{br} = \mathbf{W}_1^T \mathbf{v}_{vs}$$

$$[0042] \quad \mathbf{j}_{br} = \mathbf{W}_2^T \mathbf{i}_{cs}$$

[0043] 其中 \mathbf{e}_{br} 为支路电压源电压向量， \mathbf{j}_{br} 为支路电流源电流向量， \mathbf{v}_{vs} 为输入电压向量， \mathbf{i}_{cs} 为输入电流向量。

[0044] 对于配电网来说，分布式电源的输入量为电流。因此为了不失一般性，将模型输入量定义为2种类型，即电压输入端子和电流输入端子，如图1所示。结合实际情况，定义电压输入端子电流 i_{cs} 与电流输入端子电压 v_{vs} 为模型输出量，可以得到以基本回路电流 \mathbf{i}_x 和电容电压 \mathbf{v}_c 为状态变量的配电网状态空间方程如下式：

$$[0045] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{B}_b \mathbf{L}_{br} \mathbf{B}_b^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^T \mathbf{C}_{br} \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}}_x \\ \dot{\mathbf{v}}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_b \mathbf{R}_{br} \mathbf{B}_b^T & \mathbf{B}_b \mathbf{M} \\ -\mathbf{M}^T \mathbf{B}_b^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_x \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{B}_b \mathbf{W}_1^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^T \mathbf{W}_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{vs} \\ \mathbf{i}_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[0046] \quad \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{vs} \\ \mathbf{v}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_1 \mathbf{B}_b^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{W}_2 \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_x \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix}$$

[0047] 其中 \mathbf{i}_x 为基本回路电流向量， \mathbf{v}_c 为支路电容电压向量， \mathbf{C}_{br} 为支路电容矩阵，支路电容关联矩阵 $\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{n_{br} \times n_c}$ ， n_c 表示网络中电容个数， n_{br} 表示网络中支路个数，取值方式与 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2 相同。对照标准状态方程式：

$$[0048] \quad \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{G} \mathbf{x} = \mathbf{B} \mathbf{u}$$

$$[0049] \quad \mathbf{y} = \mathbf{L}^T \mathbf{x}$$

[0050] 可得标准状态方程对应的系数矩阵表达式如下：

$$[0051] \quad C = \begin{bmatrix} B_b L_{br} B_b^T & 0 \\ 0 & M^T C_{br} M \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} B_b R_{br} B_b^T & B_b M \\ -M^T B_b^T & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0052] \quad B = \begin{bmatrix} -B_b W_1^T & 0 \\ 0 & M^T W_2^T \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} -B_b W_1^T & 0 \\ 0 & M^T W_2^T \end{bmatrix}$$

[0053] 步骤3),对配电网网架部分的状态空间方程降阶,求取其降阶后的状态空间方程,

[0054] 在建立完内部配电网架部分的状态空间方程后,对模型进行降阶处理。以下为具体降阶方法:

[0055] 假设某个线性时不变的动态系统:

$$[0056] \quad E \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + Bu(t)$$

$$[0057] \quad y(t) = B^T x(t)$$

[0058] 计算得到该系统的拉普拉斯域下的传递函数如下:

$$[0059] \quad H(s) = B^T (s_0 E - A + (s - s_0) E)^{-1} B$$

$$[0060] \quad = B^T (I + (s - s_0) M)^{-1} R$$

[0061] 其中

$$[0062] \quad M := (s_0 E - A)^{-1} E, R := (s_0 E - A)^{-1} B$$

[0063] n阶Krylov子空间可以通过下面得到:

$$[0064] \quad \kappa_n(M, R) = \text{colspan}[R \ MR \ M^2 R \ \cdots \ M^{n-1} R]$$

[0065] 进而得到空间的正交特征向量 V_n :

$$[0066] \quad \text{colspan} V_n = \kappa_n(M, R)$$

[0067] 再利用SPRIM算法,获取特征矩阵 \hat{V} :

$$[0068] \quad \kappa_n(M, R) \subseteq \text{colspan} \hat{V}$$

[0069] 将 V_n 根据状态变量中的电压、电流量拆分为子向量 \hat{V}_1 和 \hat{V}_2 ,其中 \hat{V}_1 、 \hat{V}_2 分别代表状态变量中的电压和电流量,利用 \hat{V}_1 和 \hat{V}_2 可以构造得到特征矩阵 \hat{V}

$$[0070] \quad V_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1 \\ \hat{V}_2 \end{bmatrix}, \hat{V} = \begin{bmatrix} \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2 \end{bmatrix}$$

[0071] 则以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程可以变换为下面降阶后的状态空间方程:

$$[0072] \quad C_n \dot{x}_n + G_n x_n = B_n u$$

$$[0073] \quad y = L_n^T x_n$$

[0074] 其中,上式方程加下标n表示降阶后的状态空间方程,该方程矩阵的阶数小于降阶前的系统。上述状态方程对应的系数矩阵表达式如下:

$$[0075] \quad C_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1^T B_b L_{br} B_b^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T C_{br} M \hat{V}_2 \end{bmatrix}, G_n = \begin{bmatrix} \hat{V}_1^T B_b R_{br} B_b^T \hat{V}_1 & \hat{V}_1^T B_b M \hat{V}_2 \\ -\hat{V}_2^T M^T B_b^T \hat{V}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0076] \quad B_n = \begin{bmatrix} -\hat{V}_1^T B_b W_1^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T W_2^T \hat{V}_2 \end{bmatrix}, L_n = \begin{bmatrix} -\hat{V}_1^T B_b W_1^T \hat{V}_1 & 0 \\ 0 & \hat{V}_2^T M^T W_2^T \hat{V}_2 \end{bmatrix}$$

[0077] 步骤4), 对外部非线性区域建立分布式电源的状态空间方程,

[0078] 对于外部非线性区域的分布式电源, 它由三个子模块组成: 功率控制、电流控制以及网侧滤波器, 分别建立其状态空间方程。图3为逆变器型分布式电源的控制框图。

[0079] 对于功率控制, 假设分布式电源采用恒功率控制策略 (PQ控制), 瞬时有功功率 p 和无功功率 q 由下式计算得到:

$$[0080] \quad p = v_{od} i_{od} + v_{oq} i_{oq}$$

$$[0081] \quad q = v_{od} i_{oq} - v_{oq} i_{od}$$

[0082] 其中 v_{od} 、 i_{od} 、 v_{oq} 、 i_{oq} 分别为电网电压、电流在两相同步旋转坐标系dq下的d轴电压、电流和q轴电压、电流。

[0083] 功率控制利用PI调节, 则对应的状态方程如下:

$$[0084] \quad \frac{d\phi_p}{dt} = P_{ref} - p, \quad \frac{d\phi_q}{dt} = Q_{ref} - q$$

[0085] 以及代数方程为:

$$[0086] \quad i_{od}^* = K_p (P_{ref} - p) + K_i \phi_p$$

$$[0087] \quad i_{oq}^* = K_p (Q_{ref} - q) + K_i \phi_q$$

[0088] 其中, P_{ref} 和 Q_{ref} 分别是有功、无功功率指令, ϕ_p 和 ϕ_q 是状态变量, i_{od}^* 和 i_{oq}^* 为电流控制的输入参考值, K_p 和 K_i 分别是功率控制中的比例调节增益和积分调节增益。

[0089] 则功率控制的状态空间方程可列写如下, 方程的输入量为参考功率和反馈功率:

$$[0090] \quad \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} + B_p \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} + B_v \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix}$$

$$[0091] \quad \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} = C_v \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} + D_{v1} \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} + D_{v2} \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix}$$

[0092] 其中:

$$[0093] \quad B_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_v = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, C_v = \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_i \end{bmatrix}, D_{v1} = \begin{bmatrix} K_p & 0 \\ 0 & K_p \end{bmatrix}, D_{v2} = \begin{bmatrix} -K_p & 0 \\ 0 & -K_p \end{bmatrix}$$

$$[0094] \quad \begin{bmatrix} \phi_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_d & \phi_q \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} PQ_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ref} & Q_{ref} \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} pq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p & q \end{bmatrix}^T, \begin{bmatrix} i_{odq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{od}^* & i_{oq}^* \end{bmatrix}^T$$

[0095] 对于电流控制, 对应状态方程为:

$$[0096] \quad \frac{d\phi_d}{dt} = i_{od}^* - i_{od}, \quad \frac{d\phi_q}{dt} = i_{oq}^* - i_{oq}$$

[0097] 以及代数方程为:

$$[0098] \quad v_{id}^* = K_{pv} (i_{od}^* - i_{od}) + K_{iv} \phi_d - \omega L_c i_{oq} + v_{od}$$

$$[0099] \quad v_{iq}^* = K_{pv} (i_{oq}^* - i_{oq}) + K_{iv} \phi_q + \omega L_c i_{od} + v_{oq}$$

[0100] 其中, ϕ_d 和 ϕ_q 是状态变量, v_{id}^* 和 v_{iq}^* 为电流控制的输出参考值, ω 为电网角频率, L_c 为逆变器出口侧滤波电感的大小, K_{pv} 和 K_{iv} 分别是电流控制中的比例调节增益和积分调节增益。

[0101] 则电流控制的状态空间方程可列写如下,方程的输入量为参考电流和反馈电流:

$$[0102] \quad [\dot{\phi}_{dq}] = [0][\phi_{dq}] + B_{i1}[i_{odq}^*] + B_{i2}[i_{odq}]$$

$$[0103] \quad [v_{idq}^*] = C_i[\phi_{dq}] + D_{i1}[i_{odq}^*] + D_{i2}[v_{odq}] + D_{i3}[i_{odq}]$$

[0104] 其中:

$$[0105] \quad B_{i1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B_{i2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, C_i = \begin{bmatrix} K_{iv} & 0 \\ 0 & K_{iv} \end{bmatrix}, D_{i1} = \begin{bmatrix} K_{pv} & 0 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}, D_{i2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, D_{i3} = \begin{bmatrix} -K_{pv} & -\omega L \\ \omega L & -K_{pv} \end{bmatrix}$$

$$[0106] \quad [\varphi_{dq}] = [\varphi_d \ \varphi_q]^T, [i_{odq}^*] = [i_{od}^* \ i_{oq}^*]^T, [i_{odq}] = [i_{od} \ i_{oq}]^T, [v_{odq}] = [v_{od} \ v_{oq}]^T$$

[0107] 对于网侧滤波器,在假设逆变器实际提供输出电压 v_{id} 、 v_{iq} 等于指令电压 v_{id}^* 、 v_{iq}^* ($v_{id} = v_{id}^*$, $v_{iq} = v_{iq}^*$)的情况下,滤波器模型可列写如下:

$$[0108] \quad L_c \frac{di_{od}}{dt} = \omega L_c i_{oq} + v_{id} - v_{od}$$

$$[0109] \quad L_c \frac{di_{oq}}{dt} = -\omega L_c i_{od} + v_{iq} - v_{oq}$$

[0110] 则网侧滤波器的状态空间方程为:

$$[0111] \quad [\dot{i}_{odq}] = A_L [i_{odq}] + B_{L1} [v_{idq}] + B_{L2} [v_{odq}]$$

[0112] 其中:

$$[0113] \quad A_L = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}, B_{L1} = \begin{bmatrix} 1/L_c & 0 \\ 0 & 1/L_c \end{bmatrix}, B_{L2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[0114] \quad [i_{odq}] = [i_{od} \ i_{oq}]^T, [v_{idq}] = [v_{id} \ v_{iq}]^T, [v_{odq}] = [v_{od} \ v_{oq}]^T$$

[0115] 将上述功率控制、电流控制、网侧滤波器的状态空间方程整理合并,得到整个分布式电源的状态空间方程:

$$[0116] \quad [\dot{\mathbf{x}}_{DG}] = \mathbf{A}_v [\mathbf{x}_{DG}] + \mathbf{B}_{v1} [\mathbf{v}_{odq}] + \mathbf{B}_{v2} [PQ_{ref}]$$

$$[0117] \quad [i_{dq}] = C_t [x_{DG}]$$

[0118] 其中:

$$[0119] \quad \mathbf{x}_{DG} = [\varphi_{dq} \ \phi_{dq} \ \mathbf{i}_{dq}]$$

$$[0120] \quad \mathbf{A}_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_v S \\ B_{i1} C_v & 0 & B_{i1} D_{v2} S + B_{i2} \\ B_{L1} D_{i1} C_v & B_{L1} C_i & A_L + B_{L1} D_{i3} + B_{L1} D_{i1} D_{v2} S \end{bmatrix}$$

$$[0121] \quad \mathbf{B}_{v1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{L1} D_{i2} + B_{L2} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{v2} = \begin{bmatrix} B_p \\ B_{i1} D_{v1} \\ B_{L1} D_{i1} D_{v1} \end{bmatrix}$$

$$[0122] \quad \mathbf{C}_t = [0 \ 0 \ I], \mathbf{S} = \begin{bmatrix} v_{od} & v_{oq} \\ -v_{oq} & v_{od} \end{bmatrix}$$

[0123] 步骤5),对内部、外部区域的状态空间方程进行动态相量建模,

[0124] 运用基于信号调制理论的动态相量模型,即对时域内周期为T的信号选择宽度为T的时间窗内的主要傅立叶系数,对配电网内部区域的以基本回路电流和电容电压为状态变量的配电网状态空间方程以及外部区域的分布式电源状态空间方程改写成动态相量的表达形式,分别计算如下:

$$[0125] \quad C_n \left\langle \frac{dx_n}{dt} \right\rangle_k + G_n \langle x_n \rangle_k = C_n \left(\frac{d\langle x_n \rangle_k}{dt} + jk\omega \langle x_n \rangle_k \right) + G_n \langle x_n \rangle_k = B_n \langle u \rangle_k$$

$$[0126] \quad \langle y \rangle_k = L_n^T \langle x_n \rangle_k$$

$$[0127] \quad \left\langle \frac{dx_{DG}}{dt} \right\rangle_k = \frac{d\langle x_{DG} \rangle_k}{dt} + jk\omega \langle x_{DG} \rangle_k = A_v \langle x_{DG} \rangle_k + B_{v1} \langle v_{dq} \rangle_k + B_{v2} \langle PQ_{ref} \rangle_k$$

$$[0128] \quad \langle i_{dq} \rangle_k = C_t \langle x_{DG} \rangle_k$$

[0129] 其中, $\langle \cdot \rangle_k$ 代表相关变量的k阶动态相量。

[0130] 由于上述分布式电源的控制均是基于dq0坐标系,则将分布式电源的动态相量模型转换为abc坐标系以实现内部区域与外部区域的互联,转换关系满足以下方程:

$$[0131] \quad \langle f_D \rangle_k = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_p \rangle_{k+1} + \langle f_n \rangle_{k-1}), \langle f_Q \rangle_k = \frac{j}{\sqrt{2}} (\langle f_p \rangle_{k+1} - \langle f_n \rangle_{k-1})$$

$$[0132] \quad \langle f_p \rangle_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_D \rangle_k - j \langle f_Q \rangle_k), \langle f_n \rangle_{k-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\langle f_D \rangle_k + j \langle f_Q \rangle_k)$$

[0133] 其中,f代表可能的电量参数,例如电压或电流,DQ代表同步旋转坐标系,p、n分别代表正序和负序。

[0134] 步骤6),内部、外部区域的动态相量模型互联,

[0135] 将动态相量表达形式的内部区域配电网状态空间方程和外部区域分布式电源状态空间方程以网络接口的形式对接,即内部区域状态空间方程的输入量为外部区域状态空间方程的输出量和外接电压源的电压量,外部区域状态空间方程的输入量为内部区域状态空间方程的输出量。

[0136] 应用例

[0137] 为验证本发明所述含分布式电源配电网简化建模方法的有效性和准确性,以图4所示的典型的IEEE 34节点配电网系统为研究对象,其中包含单相、两相、三相的线路与负荷,在编号850节点上接入分布式电源,编号800节点接入电压源。应用本发明所述的建模方法对含分布式电源接入的配电网进行仿真分析,并与电磁暂态仿真结果进行对比。

[0138] 以大电源接入处的电流Is以及DG接入处的电流Idg为观察对象,图5a为DG功率指令为0.5MW时相应的仿真结果。从仿真结果可以看出,简化处理的模型与最原始模型的电磁暂态仿真结果完全吻合。说明提出的仿真模型能够准确地模拟分布式电源接入下的配电网系统。

[0139] 为充分验证本发明所述简化模型的准确性和适用性,下面考虑几种变化情况:

[0140] (1) 分布式电源功率的波动,假设分布式电源的功率在0.3s时从0.2MW上升为0.8MW,可以得到图5b的仿真结果。从仿真结果可以看出,本发明所述的模型可以很好地模拟系统的动态过程。图中所存在的偏差是因为采用的动态相量模型只提取了其中的基波频率量,其他的谐波频率量并不考虑,因此会造成一点偏差,但是很快两者就保持一致,并不

影响系统的动态行为分析。

[0141] (2) 故障情况下,假设在0.3s时节点828处发生三相接地短路故障。仿真结果如图5c所示,从结果可以看出,在故障开始发生时,本发明所述的动态相量模型能够很好地跟踪系统的动态行为,最后与原系统的稳定状态相同。

[0142] 由以上仿真结果可以看出,对于多种仿真场景,本发明所述模型的仿真结果均较为准确,稳态误差很小且过渡过程基本吻合,能很好地反映系统的动态过程和主要特征。

[0143] 仿真计算时间比较如表1所示,可以看出本发明所述的模型简化方法显著节省了仿真用时,在仿真速度上相对电磁暂态模型具有突出的优势。

[0144] 表1模型所用仿真时间对比

	模型	阶数	仿真时间区间(s)	仿真耗时(s)
[0145]	电磁暂态模型	186	[0,0.4]	20.2
	动态相量+状态方程降阶	18	[0,0.4]	5.2
		24	[0,0.4]	7.6

[0146] 可见,本发明所述的含分布式电源接入的配电网简化建模方法精度高,仿真速度快,为大规模分布式电源接入配电网的快速仿真奠定了基础。

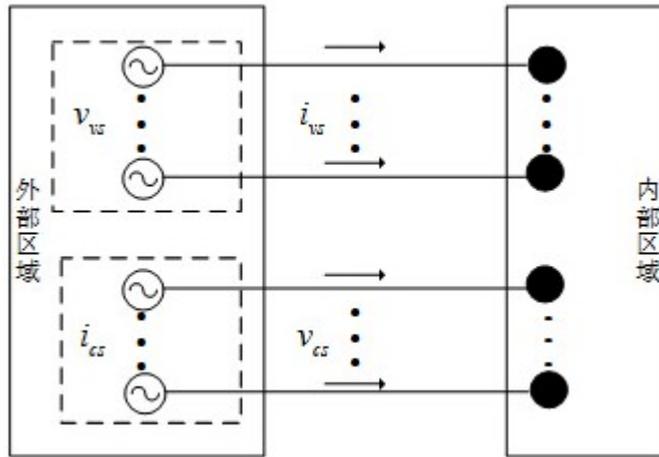


图 1

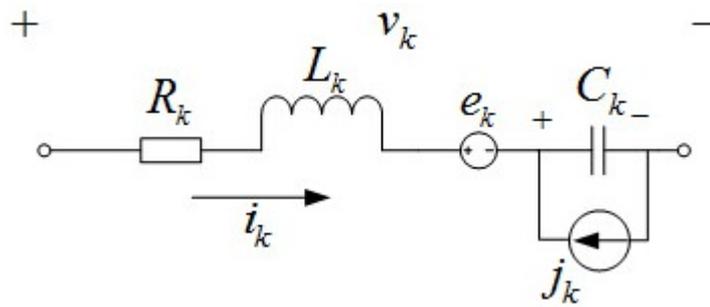


图 2

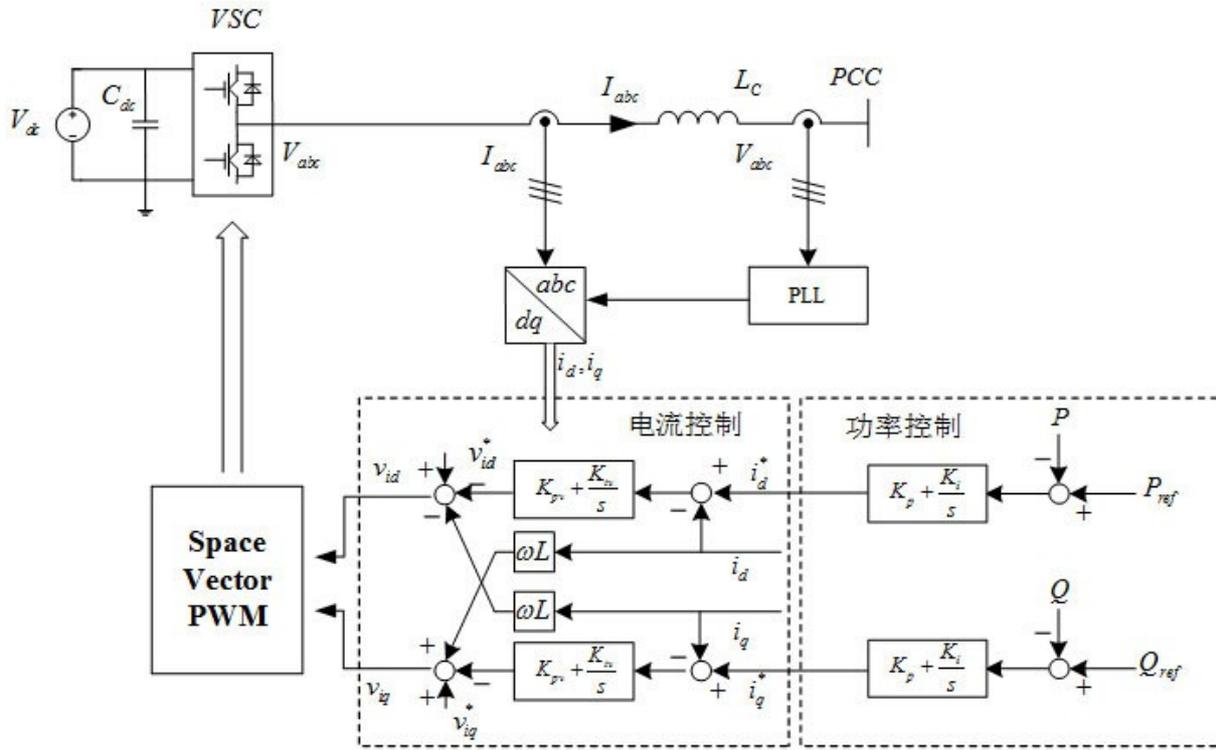


图 3

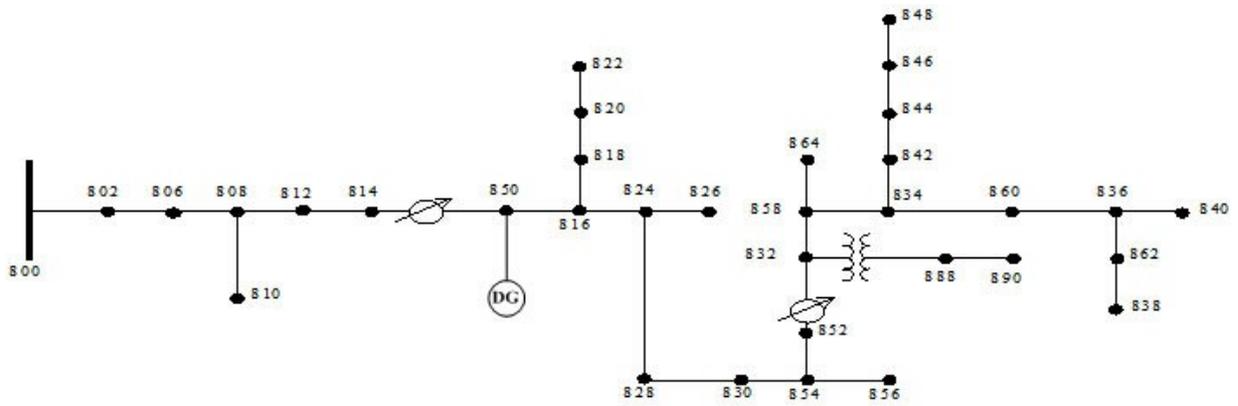


图 4

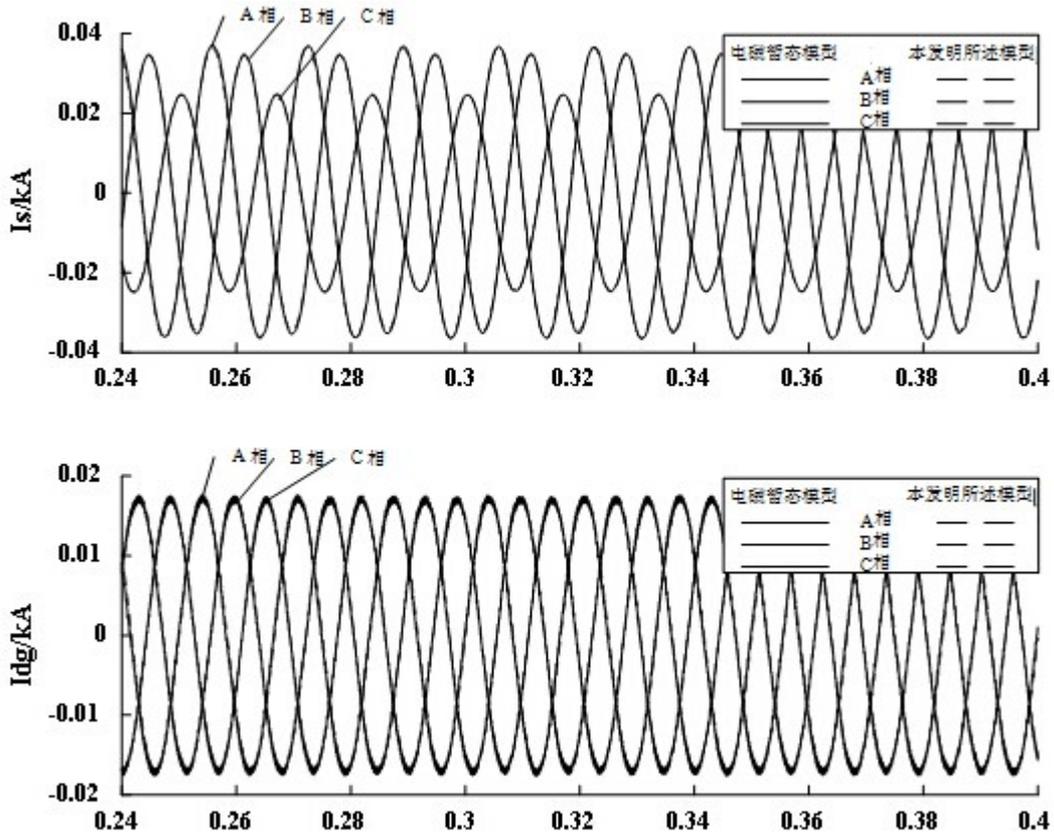


图 5a

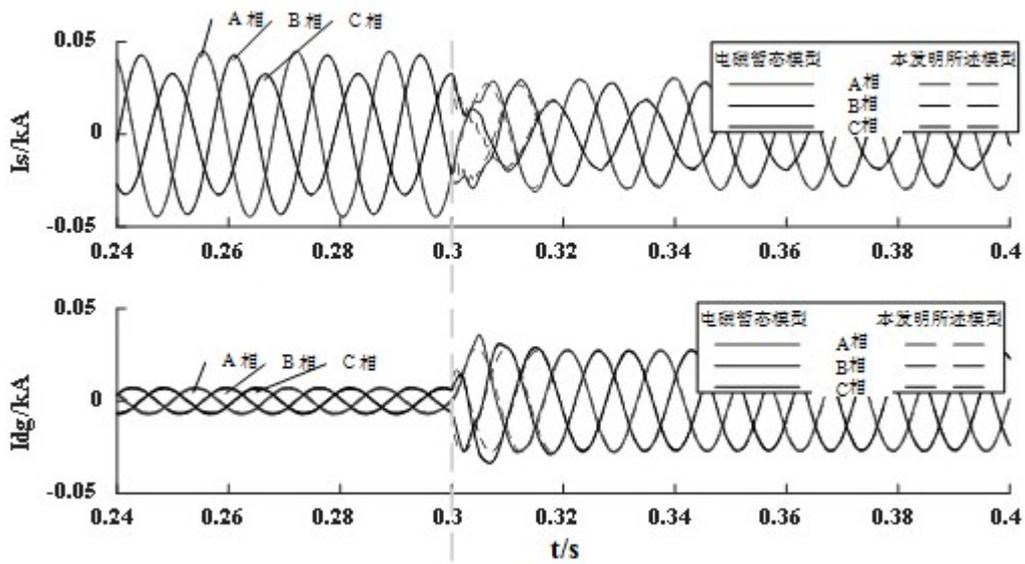


图 5b

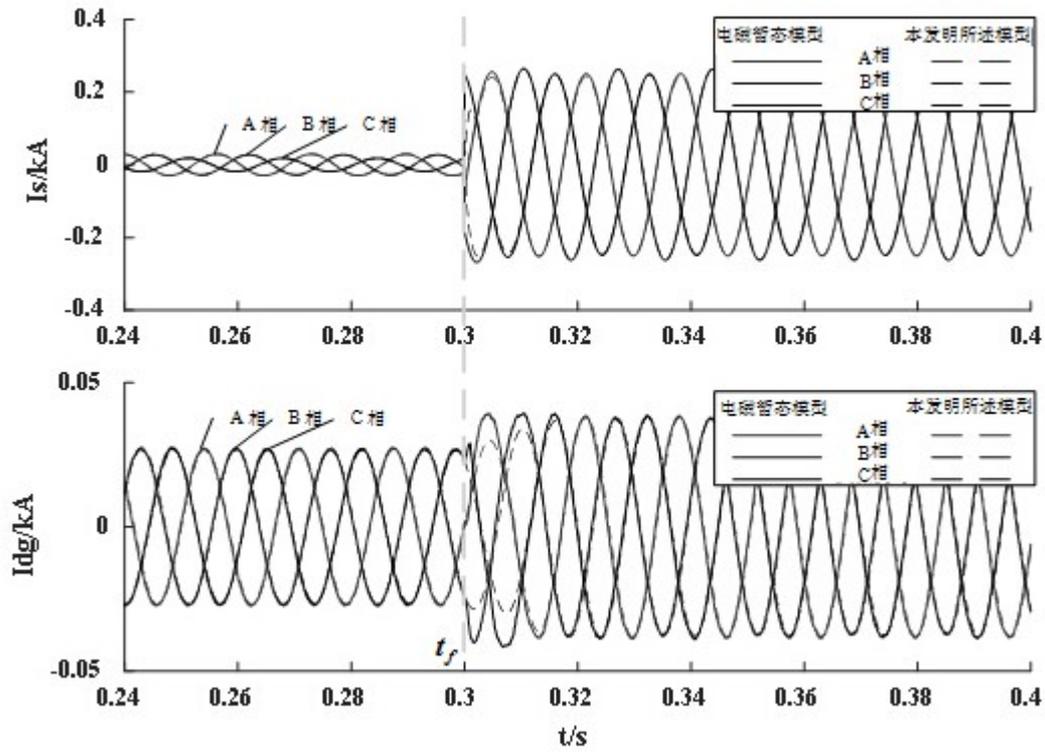


图 5c