



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105184027 B

(45)授权公告日 2018.04.06

(21)申请号 201510717484.6

(22)申请日 2015.10.29

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 105184027 A

(43)申请公布日 2015.12.23

(73)专利权人 山东大学
地址 250061 山东省济南市历下区经十路
17923号

(72)发明人 王振树 马阳阳

(74)专利代理机构 济南圣达知识产权代理有限公司 37221

代理人 张勇

(51)Int.Cl.
G06F 17/50(2006.01)

(56)对比文件

CN 104502907 A,2015.04.08,

CN 104573190 A,2015.04.29,

CN 104898115 A,2015.09.09,

US 2015103984 A1,2015.04.16,

梁彦.“两级交互式多模型算法”.《自动化学报》.2001,第27卷(第5期),

审查员 胡瑞娟

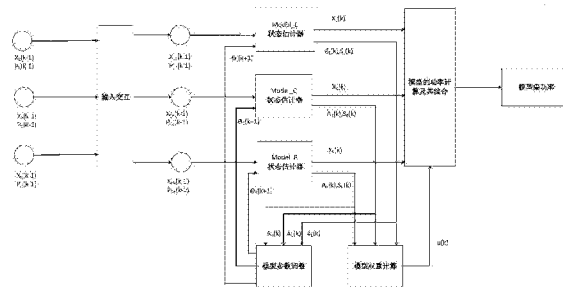
权利要求书3页 说明书10页 附图2页

(54)发明名称

一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法

(57)摘要

本发明公开了一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,包括将第一级模型集中每个模型在k-1时刻的状态变量、状态协方差矩阵进行模型的状态变量与协方差矩阵交互,获得交互后的模型的状态变量以及模型的协方差矩阵;分别将各个模型对应的状态变量和协方差矩阵输入各自的扩展卡尔曼滤波器进行模型的状态估计,得到模型估计的k时刻的状态变量以及模型的协方差矩阵;利用模型状态估计过程的似然函数值及信息协方差矩阵计算模型的权重,对各个子模型的权重加权求和得到对应的模型的参数;模型的权重用于下一时刻的状态交互以及当前时刻的模型功率输出融合。负荷建模过程是递推实现的,协方差矩阵不需要存储,节省了存储空间。



1. 一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,包括以下步骤:

步骤一:确定电力负荷模型集中的模型的结构为SLM模型;

步骤二:设定两级模型集,第一级模型集的模型所包含的模型数比较少用来表征负荷成分,每个模型分配一个权重,第一级模型集的每个模型对应于第二级模型集中的一个子模型集,第二级的模型集用来调整第一级的模型:设定一个阈值,如果第一级模型集的模型的误差小于阈值,则保持模型不变,如果模型的误差在一定时间内大于阈值,则利用第二级模型集中的子模型集对对应的第一级模型进行调整;

步骤三:将第一级模型集中每个模型在k-1时刻的状态变量、状态协方差矩阵进行交互运算,获得交互后的各个模型的状态变量以及模型的协方差矩阵;

步骤四:分别将第一级模型集中的各个模型对应的状态变量和协方差矩阵输入各自的扩展卡尔曼滤波器进行模型的状态估计,得到模型估计的k时刻的状态变量以及模型的协方差矩阵;

步骤五:利用步骤四中模型状态估计过程的似然函数值及信息协方差矩阵计算第一级模型集中的各个模型的权重;

步骤六:用模型估计的状态变量计算模型的功率,并通过各个模型的权重值计算各个模型的功率的加权和,作为模型集的综合输出,模型的权重用于下一时刻的状态交互以及当前时刻的模型功率输出融合。

2. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,根据模型状态估计过程的似然函数值判断模型是否需要调整,如果模型需要调整则利用相应的第二级模型集中的子模型集进行调整,调整后的模型参数用于下一时刻模型的计算;如果模型不需要调整,则保持不变。

3. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,对子模型集进行调整时,设定一个阈值,当模型的上一时刻的似然函数值小于阈值,则认为模型合适,不需要调整,如果似然函数值在一段时间内大于阈值,需要用第二级子模型集调整对应的第一级模型集的模型,在k时刻进行模型的遴选,设 $rg_j(k)$ 是第j个模型在k时刻的新息向量,则此模型的似然函数值为:

$$Ag(j) = \frac{\exp(-0.5rg_j(k)^T Sg_j(k)rg_j(k))}{\sqrt{|2\pi Sg_j(k)|}}$$

式中,

$$Sg_j(k) = rg_j(k) \cdot rg_j(k)^T;$$

进一步的,设子模型集模型概率转移矩阵为 Π ,各个模型权重的计算:

$$cg_j = \sum_{i=1}^N \Pi(i, j)ug_i(k-1)$$

$$Cg = \sum_{i=1}^N Ag_i * cg_i$$

$$ug_j(k) = \frac{1}{Cg} Ag_j cg_j$$

其中, ug_i 是第i个模型的权重值, cg_j 是第j个模型的归一化常数, Ag_j 是第j个模型的似

然函数值。

4. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,对各个子模型的权重加权求和得到对应的模型的参数:

$$\Theta(k) = \sum_{i=1}^N \theta_{i}(k) u_{i}(k)$$

其中, $\theta_{i}(k)$ 为k时刻子模型集中的第i个模型的参数, $\Theta(k)$ 为k时刻对应上一级模型的参数。

5. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,模型交互时,具体为:

设第一级模型集的模型的马尔科夫状态转移矩阵为Mark,计算模型间的混合概率:

$$u_{ij}(k-1|k-1) = \frac{1}{c_j} \text{Mark}(i, j) u_i(k-1)$$

式中, $i, j=1, 2, 3$; $\text{Mark}(i, j)$ 为模型i到模型j的转移概率,归一化常数 c_j 可由下式求得:

$$c_j = \sum_{i=1}^3 \text{Mark}(i, j) u_i(k-1)$$

计算输入混合状态估计值:

$$\hat{x}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 x_i(k-1) u_{ij}(k-1|k-1)$$

$$\hat{P}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 u_{ij}(k-1|k-1) \{ P_i(k-1) + [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)] \cdot [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)]^T \}$$

其中, $x_i(k-1)$ 为模型i在k-1时刻的状态变量; $\hat{x}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型j的状态变量; $P_i(k-1)$ 为模型i在k-1时刻的状态协方差矩阵; $\hat{P}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型j的状态协方差矩阵。

6. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,采用扩展卡尔曼滤波器对电机的状态变量进行估计,为了简化扩展卡尔曼滤波器的结构,同时电机的定子电阻对系统的动态特性影响较小,将电机的定子电阻 R_s 确定为0。

7. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,其特征是,模型权重计算公式如下:

似然函数计算:

$$A_i = \frac{\exp(-0.5 \gamma_i^T S_i(k)^{-1} \gamma_i)}{\sqrt{|2\pi S_i(k)|}}$$

$$u_j(k) = \frac{1}{C} A_j c_j$$

其中,

$$C = \sum_{i=1}^N A_i * c_i$$

γ_i 是第i个模型的信息误差, S_i 是第i个模型的新息协方差矩阵, A_i 是第i个模型的似然

函数值, u_j 是第 j 个模型的权重, 归一化常数 c_j 。

8. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法, 其特征是, 模型综合输出公式如下:

通过模型的状态变量计算各个模型的功率吸收的公式如下:

$$P_M(k|k) = ST * \frac{U_{Lq}(k) * E_d(k) - U_{Ld}(k) * E_q(k)}{X'$$

$$Q_M(k|k) = ST * \frac{U_{Ld}(k)^2 + U_{Lq}(k)^2 - U_{Ld}(k) * E_d(k) - U_{Lq}(k) * E_q(k)}{X'}$$

$$P(k) = P_M(k|k) + P_d(k) + P_s(k)$$

$$Q(k) = Q_M(k|k) + Q_d(k) + Q_s(k)$$

其中, P_M 、 Q_M 分别为计算出的电机的有功无功; P_d 、 Q_d 分别为计算出的配电网的有功无功; P_s 、 Q_s 分别为计算出的静负荷的有功无功; P 、 Q 分别为计算出的整个模型的有功无功。

9. 如权利要求1所述的一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法, 其特征是, 通过对各个模型的功率的加权求和获得模型集的功率:

$$y(k) = \sum_{i=1}^3 y_i(k) u_i(k)$$

式中,

$$y_i(k) = \begin{bmatrix} P_i(k) \\ Q_i(k) \end{bmatrix}; \quad y(k) = \begin{bmatrix} P_z(k) \\ Q_z(k) \end{bmatrix}, \quad P_i, Q_i \text{ 分别为第 } i \text{ 个模型的有功无功; } P_z, Q_z \text{ 为整个模型集}$$

的功率, $u_i(k)$ 是第 i 个模型在 k 时刻的权重。

一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种电力负荷建模方法,具体涉及一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法。

背景技术

[0002] 电力负荷是电力系统的重要组成部分。在电力系统的设计、运行、分析中,建立准确的负荷模型是十分必要的,模型精度影响着电力系统数字仿真和分析的精度。电力系统主要由发电机、输电网络以及电力负荷三大部分构成。现阶段,发电机模型和电网络模型已相当成熟,然而负荷模型则相对简单。这已经严重制约了电力系统数字仿真结果精度和可信度的提高。而且负荷模型对电力系统动态行为的定量计算,如潮流计算、短路计算、安全分析、电压稳定等也有一定影响。在临界情况下,还有可能从根本上改变定性的结论。实际中的电力负荷具有复杂性、分散性、随机性、时变性等特点。因此,对实际负荷构建一个精确的固定的模型是很困难的,电力系统负荷建模是电力系统公认的难题之一。

[0003] 电力负荷模型的本质是对实际电力系统中的成千上万的用电设备的总体特性的数学表述。在电力负荷建模的历史中,许多杰出的学者构建了一系列的经典的负荷模型结构,如传统的机理动态负荷模型(Classic Load Models,CLM),直接考虑配电网的综合负荷模型(Synthesis Load Models,SLM)以及考虑发电机模型的增广负荷模型(Generalized Load Models,GLM)等。由于电力负荷本身的特点,电力负荷成分不是固定的,有可能随时发生变化,它的时变性和随机性是耦合在一起的。这也是负荷建模的困难之处。随着电力电子技术,计算机技术,现代控制理论等一系列新型的技术和理论在电力系统中的应用,一些风机,光伏电源等新型的分布式电源并入配电网,微电网技术得到大力发展,同时电气化铁路的换流器、变频器、可控整流装置等电力电子装置在电力系统负荷中大量应用,这些都对电力负荷的特性造成一定的影响,使得电力负荷的特性更为复杂。传统的负荷建模方法都是使用一个单一的模型来尽量拟合实际系统的动态过程。当实际的负荷成分发生变化之后,传统的负荷模型势必会存在一定的误差。

发明内容

[0004] 为解决现有技术存在的不足,本发明公开了一种电力负荷建模方法,具体为一种实现简单、计算量较小、精确度高的电力负荷建模方法。本发明提出的方法构建的电力负荷模型克服了上述传统负荷模型在负荷成分发生变化存在误差的问题。本发明可以精确的建立反映实际电力负荷成分的时变性和随机性的负荷模型。

[0005] 为实现上述目的,本发明的具体方案如下:

[0006] 一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一:确定电力负荷模型集中的模型的基本结构为SLM模型;

[0008] 步骤二:设定两级模型集,第一级模型集的模型所包含的模型数比较少用来表征负荷成分,每个模型分配一个权重,第一级模型集的每个模型对应于第二级模型集中的一

个子模型集,第二级的模型集用来调整第一级的模型,设定一个阈值,如果第一级模型的误差小于阈值,则保持模型不变,如果模型的误差在一定时间内大于阈值,则利用第二级模型集中的子模型集对对应的第一级模型进行调整;

[0009] 步骤三:将第一级模型集中各个模型在k-1时刻的状态变量、状态协方差矩阵进行交互运算,获得交互后的每个模型的状态变量以及模型的协方差矩阵;

[0010] 步骤四:分别将第一级模型集中的各个模型对应的状态变量和协方差矩阵输入各自的扩展卡尔曼滤波器进行模型的状态估计,得到模型估计的k时刻的状态变量以及模型的协方差矩阵;

[0011] 步骤五:利用步骤四中模型状态估计过程的似然函数值及信息协方差矩阵计算第一级模型集中的各个模型的权重;

[0012] 步骤六:用模型估计的状态变量计算模型的功率,并通过各个模型的权重值计算各个模型的功率加权的和作为模型集的综合输出,模型的权重用于下一时刻的状态交互以及当前时刻的模型功率输出融合。

[0013] 进一步的,根据模型状态估计过程的似然函数值判断第一级模型是否需要调整,如果模型需要调整则利用对应的第二级模型集中的子模型集进行调整,调整后的模型参数用于下一时刻模型的计算;如果模型不需要调整,则保持不变。

[0014] 进一步的,利用子模型集对相应的第一级模型进行调整时,设定一个阈值,当第一级模型的上一时刻的似然函数值小于阈值,则认为模型合适,不需要调整。如果在一定时间内大于阈值,则需要用对应的第二级的子模型集调整对应的第一级模型,在k时刻进行模型的遴选,设 $rg_j(k)$ 是第j个模型在k时刻的新息向量,则此模型的似然函数值为:

$$[0015] \quad Ag(j) = \frac{\exp(-0.5rg_j(k)^T Sg_j(k)rg_j(k))}{\sqrt{|2\pi Sg_j(k)|}}$$

[0016] 式中,

$$[0017] \quad Sg_j(k) = rg_j(k) \cdot rg_j(k)^T。$$

[0018] 进一步的,设子模型集中的模型概率转移矩阵为 Π ,各个模型权重的计算:

$$[0019] \quad cg_j = \sum_{i=1}^N \Pi(i,j)ug_i(k-1)$$

$$[0020] \quad Cg = \sum_{i=1}^N Ag_i * cg_i$$

$$[0021] \quad ug_j(k) = \frac{1}{Cg} Ag_j cg_j$$

[0022] 其中, ug_i 是第i个模型的权重值, cg_j 是第j个模型的归一化常数, Ag_j 是第j个模型的似然函数值。

[0023] 进一步的,对各个子模型的权重加权求和得到对应的模型的参数:

$$[0024] \quad Theta(k) = \sum_{i=1}^N theta_i(k)ug_i(k)$$

[0025] 其中, $theta_i(k)$ 为k时刻子模型集中的第i个模型的参数, $Theta(k)$ 为k时刻对应

上一级模型的参数。

[0026] 进一步的,模型交互时,具体为:

[0027] 设第一级模型集中模型的马尔科夫状态转移矩阵为Mark,计算模型间的混合概率:

$$[0028] \quad u_{ij}(k-1|k-1) = \frac{1}{c_j} \text{Mark}(i, j) u_i(k-1)$$

[0029] 式中, $i, j = 1, 2, 3$; Mark(i, j)为模型*i*到模型*j*的转移概率,归一化常数 c_j 可由下式求得:

$$[0030] \quad c_j = \sum_{i=1}^3 \text{Mark}(i, j) u_i(k-1)$$

[0031] 计算输入混合状态估计值:

$$[0032] \quad \hat{x}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 x_i(k-1) u_{ij}(k-1|k-1)$$

$$[0033] \quad \hat{P}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 u_{ij}(k-1|k-1) \{ P_i(k-1) + [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)] \cdot [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)]^T \}$$

[0034] 其中, $x_i(k-1)$ 为模型*i*在*k-1*时刻的状态变量; $\hat{x}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型*j*的状态变量; $P_i(k-1)$ 为模型*i*在*k-1*时刻的状态协方差矩阵; $\hat{P}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型*j*的状态协方差矩阵。

[0035] 进一步的,采用扩展卡尔曼滤波器对电机的状态变量进行估计,为了简化扩展卡尔曼滤波器的结构,同时电机的定子电阻对系统的动态特性影响较小,将电机的定子电阻 R_s 确定为0。

[0036] 进一步的,电机的状态预测方程为:

$$[0037] \quad E_d(k|k-1) = (1 - \frac{T_s * X}{Td0 * X'}) E_d(k-1) + T_s * w_B * s(k-1) * E_q(k-1) + \frac{T_s * (X - X')}{Td0 * X'} * U_{Ld}(k-1)$$

$$[0038] \quad E_q(k|k-1) = -T_s * w_B * s(k-1) * E_d(k-1) + (1 - \frac{T_s * X}{Td0 * X'}) E_q(k-1) + \frac{T_s * (X - X')}{Td0 * X'} * U_{Lq}(k-1)$$

$$[0039] \quad s(k|k-1) = s(k-1) + \frac{T_s}{T_j} (K_L (a + (1-a)(1-s(k-1))^{MP}) - \frac{U_{Lq}(k-1)E_d(k-1) - U_{Ld}(k-1)E_q(k-1)}{X'})$$

[0040] 式中, E_d 是电机的次暂态电势在d轴的分量, E_q 是电机的次暂态电势在q轴的分量, s 是电机的转差率; T_s 为采样周期, w_B 为同步角速度; $Td0$ 为暂态开路时间常数, X 为转子开路电抗, X' 为转子不动时短路电抗; K_L 为电机的负荷率, a 为电机恒定转矩系数, MP 与转速有关的转矩的方次; U_{Ld} 、 U_{Lq} 分别为母线电压在d、q轴的分量。

[0041] 进一步的,状态协方差预测方程:

$$[0042] \quad P(k|k-1) = F(k-1) P(k-1) F(k-1)^T + Q(k-1)$$

[0043] 其中, Q 为过程噪声协方差矩阵,

$$[0044] \quad F(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s * X}{Td0 * X'} & Ts * w_B * s(k-1) & Ts * w_B * E_q(k-1) \\ -Ts * w_B * s(k-1) & 1 - \frac{T_s * X}{Td0 * X'} & -Ts * w_B * E_d(k-1) \\ \frac{T_s * U_{Lq}(k-1)}{T_j * X'} & \frac{T_s * U_{Ld}(k-1)}{T_j * X'} & 1 + \frac{1.7 * Ts * K_L * (1 - s(k-1))}{T_j} \end{bmatrix}$$

[0045] 进一步的,量测预测方程为:

$$[0046] \quad P_M(k|k-1) = \frac{U_{Lq}(k)E_d(k|k-1) - U_{Ld}(k)E_q(k|k-1)}{X'}$$

$$[0047] \quad Q_M(k|k-1) = \frac{U_{Ld}(k)^2 + U_{Lq}(k)^2 - U_{Ld}(k)E_d(k|k-1) - U_{Lq}(k)E_q(k|k-1)}{X'}$$

[0048] 进一步的,新息协方差方程为:

$$[0049] \quad S(k) = H(k) P(k|k-1) * H(k)^T + R(k)$$

[0050] 式中,R为量测噪声协方差矩阵,

$$[0051] \quad H(k) = \begin{bmatrix} \frac{U_{Lq}(k)}{X'} & -\frac{U_{Ld}(k)}{X'} & 0 \\ -\frac{U_{Ld}(k)}{X'} & -\frac{U_{Lq}(k)}{X'} & 0 \end{bmatrix}$$

[0052] 进一步的,滤波增益矩阵方程:

$$[0053] \quad W(k) = P(k|k-1) H(k)^T S(k)^{-1}$$

[0054] 进一步的,状态更新方程与状态协方差更新方程

$$[0055] \quad x(k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)\gamma(k)$$

[0056] 进一步的,新息方程为:

$$[0057] \quad \gamma(k) = \begin{bmatrix} P_M(k)/ST \\ Q_M(k)/ST \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_M(k|k-1) \\ Q_M(k|k-1) \end{bmatrix}$$

$$[0058] \quad P_M(k) = P_L(k) - P_d(k) - P_s(k)$$

$$[0059] \quad Q_M(k) = Q_L(k) - Q_d(k) - Q_s(k)$$

[0060] 式中, P_M 、 Q_M 分别是通过对量测数据计算获得的电机的有功无功数值; P_L 、 Q_L 分别是量测的总体的负荷有功无功数值; P_d 、 Q_d 分别是配电网的有功无功数值; P_s 、 Q_s 分别是静负荷的有功无功数值; ST 为电机容量基准值与系统容量基准值的比值, $ST = \frac{K_{pm} * P_{L0}}{K_L * U_{L0}}$, K_{pm} 为电

机的比例, P_{L0} 负荷初始功率, U_{L0} 是初始电压。

[0061] 进一步的,状态协方差更新方程

$$[0062] \quad P(k) = P(k|k-1) - W(k) S(k) W(k)^T$$

[0063] 进一步的,模型权重计算公式如下:

[0064] 似然函数计算:

$$[0065] \quad A_i = \frac{\exp(-0.5\gamma_i^T S_i(k)^{-1} \gamma_i)}{\sqrt{|2\pi S_i(k)|}}$$

$$[0066] \quad u_j(k) = \frac{1}{C} A_j c_j$$

[0067] 其中,

$$[0068] \quad C = \sum_{i=1}^N A_i * c_i$$

[0069] γ_i 是第 i 个模型的信息误差, S_i 是第 i 个模型的新息协方差矩阵, A_i 是第 i 个模型的似然函数值, u_j 是第 j 个模型的权重。

[0070] 进一步的, 模型综合输出公式如下:

[0071] 通过模型的状态变量计算各个模型的功率吸收的公式如下:

$$[0072] \quad P_M(k|k) = ST * \frac{U_{Lq}(k) * E_d(k) - U_{Ld}(k) * E_q(k)}{X'}$$

$$[0073] \quad Q_M(k|k) = ST * \frac{U_{Ld}(k)^2 + U_{Lq}(k)^2 - U_{Ld}(k) * E_d(k) - U_{Lq}(k) * E_q(k)}{X'}$$

$$[0074] \quad P(k) = P_M(k|k) + P_d(k) + P_s(k)$$

$$[0075] \quad Q(k) = Q_M(k|k) + Q_d(k) + Q_s(k)$$

[0076] 其中, P_M 、 Q_M 分别为计算出的电机的有功无功; P_d 、 Q_d 分别为计算出的配电网的有功无功; P_s 、 Q_s 分别为计算出的静负荷的有功无功; P 、 Q 分别为计算出的整个模型的有功无功。

[0077] 进一步的, 通过对各个模型的功率的加权求和获得模型集的功率。

$$[0078] \quad y(k) = \sum_{i=1}^3 y_i(k) u_i(k)$$

[0079] 式中,

$$[0080] \quad y_i(k) = \begin{bmatrix} P_i(k) \\ Q_i(k) \end{bmatrix}; \quad y(k) = \begin{bmatrix} P_z(k) \\ Q_z(k) \end{bmatrix}。 P_i、Q_i \text{ 分别为第 } i \text{ 个模型的有功无功; } P_z、Q_z \text{ 为整个模}$$

型集的功率。

[0081] 本发明的有益效果:

[0082] 1. 负荷建模过程是递推实现的, 协方差矩阵不需要存储, 节省了存储空间。

[0083] 2. 状态估计算法采用扩展卡尔曼滤波器, 负荷模型的状态变量的估计值可以十分精确, 模型的误差很小。

[0084] 3. 构建子模型集来调整相应的模型, 使得在负荷成分改变的情况下, 模型的参数可以自适应调整, 因此, 模型可以很好的反映负荷的时变性与随机性。

[0085] 4. 算法是递推实现的且计算量比较小。因此, 如果计算机的运算速度足够快的话, 负荷模型可以实时建立。

[0086] 5. 本发明之基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法适用于针对变电站负荷时变性和随机性的负荷建模, 也适用于考虑地域分散性的不同变电站负荷的建模, 能够解决负荷时变性造成建模困难的问题, 本方法极具工程实用价值。

附图说明

[0087] 图1本发明之基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法结构图；

[0088] 图2通过子模型对相应的模型进行参数调整的算法的结构图；

[0089] 图3模型集中负荷模型的结构示意图。

具体实施方式：

[0090] 下面结合附图对本发明进行详细说明：

[0091] 一种基于交互式多模型算法的电力负荷建模方法通过递推运算的形式进行建模，包括以下步骤：

[0092] 步骤一：确定电力负荷模型集中的模型的结构为SLM；

[0093] 步骤二：设定两级模型集，第一级的模型所包含的模型数比较少用来表征负荷成分，每个模型分配一个权重。第一级的每个模型对应于第二级模型集中的一个子模型集，第二级的模型集用来调整第一级的模型；设定一个阈值，如果第一级模型的误差小于阈值，则保持模型不变，如果模型的误差在一定时间内大于阈值，则利用第二级模型集中的子模型集对对应的第一级模型进行调整；

[0094] 步骤三：通过马尔科夫状态转移矩阵以及模型的权重，对第一级的各个模型的状态变量和协方差矩阵进行阵进行交互运算；

[0095] 步骤四：用扩展卡尔曼滤波器对各个模型的状态变量进行状态估计；

[0096] 步骤五：通过每个模型的状态估计误差计算各个模型的权重值。

[0097] 步骤六：用模型估计的状态变量计算模型的功率，并通过各个模型的权重值计算各个模型的功率加权的和作为模型集的综合输出。

[0098] 模型集中是设定为两级的，第一级模型直接表示负荷的特性，第一级中含有较少的模型。第二级的模型集用于调整第一级的模型，因此，每个第一级的模型都对应于一个第二级模型集中的一个子模型集。SLM是模型的具体结构，第一级和第二级的模型集中的每个模型都是这种结构的。

[0099] 所述步骤一中，第一级模型集中的模型记为：Model_L、Model_C、Model_R。每个模型对应一个确定的第二级模型集中的子模型集，模型集的区别主要在于电机比例的差别，其中，Model_L对应于小电机比例的负荷模型集；Model_C对应于中电机比例的负荷模型集；Model_R对应于大电机比例的负荷模型集。每个第二级的子模型集在建立的时候根据参数的变化范围进行离散化，然后再根据参数的具体情况去掉不合理的模型，选取合理的模型，减少模型的个数，同时模型集中还包含一些极端模型。通过具体的分析，确定各个子模型集。

[0100] 所述步骤二中，设定一个阈值，当第一级的模型的上一时刻的似然函数值小于阈值，则认为模型合适，不需要调整。如果似然函数值在一定时间内大于阈值，需要用第二级的子模型集调整对应的上一级模型。子模型集包含7个合适的模型。在k时刻进行模型的遴选，设 $rg_j(k)$ 是第j个模型在k时刻的新息向量，则此模型的似然函数值为：

$$[0101] \quad Ag(j) = \frac{\exp(-0.5rg_j(k)^T Sg_j(k)rg_j(k))}{\sqrt{|2\pi Sg_j(k)|}}$$

[0102] 式中,

$$[0103] \quad Sg_j(k) = rg_j(k) \cdot rg_j(k)^T$$

[0104] 根据模型集上一次调整时的子模型的权重情况分配各个模型的位置,权重值越大的位置,对应的模型似然函数值越大。

[0105] 设子模型集模型之间的概率转移矩阵为 Π 。各个模型权重的计算:

$$[0106] \quad cg_j = \sum_{i=1}^N \Pi(i, j)ug_i(k-1)$$

$$[0107] \quad Cg = \sum_{i=1}^N Ag_i * cg_i$$

$$[0108] \quad ug_j(k) = \frac{1}{Cg} Ag_j cg_j$$

[0109] 其中, ug_i 是第*i*个模型的权重值, cg_j 是第*j*个模型的归一化常数, Ag_j 是第*j*个模型的似然函数值。

[0110] 对各个子模型的参数加权求和得到对应的模型的参数:

$$[0111] \quad Theta(k) = \sum_{i=1}^N theta_i(k)ug_i(k)$$

[0112] 其中, $theta_i(k)$ 为*k*时刻子模型集中的第*i*个模型的参数, $Theta(k)$ 为*k*时刻对应上一级模型的参数。

[0113] 所述步骤三中模型交互的公式为:

[0114] 设第一级模型的马尔科夫状态转移矩阵为 $Mark$,计算模型间的混合概率:

$$[0115] \quad u_{ij}(k-1|k-1) = \frac{1}{c_j} Mark(i, j)u_i(k-1)$$

[0116] 式中, $i, j=1, 2, 3$; $Mark(i, j)$ 为模型*i*到模型*j*的转移概率。归一化常数 c_j 可由下式求得:

$$[0117] \quad c_j = \sum_{i=1}^3 Mark(i, j)u_i(k-1)$$

[0118] 计算输入混合状态估计值:

$$[0119] \quad \hat{x}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 x_i(k-1)u_{ij}(k-1|k-1)$$

$$[0120] \quad \hat{P}_j(k-1|k-1) = \sum_{i=1}^3 u_{ij}(k-1|k-1) \{ P_i(k-1) + [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)] \cdot [\hat{x}_j(k-1|k-1) - x_i(k-1)]^T \}$$

[0121] 其中, $x_i(k-1)$ 为模型*i*在*k-1*时刻的状态变量; $\hat{x}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型*j*的状态变量; $P_i(k-1)$ 为模型*i*在*k-1*时刻的状态协方差矩阵; $\hat{P}_j(k-1|k-1)$ 为混合后模型*j*的状态协

方差矩阵。

[0122] 所述步骤四中采用扩展卡尔曼滤波器对电机的状态变量进行估计。为了简化扩展卡尔曼滤波器的结构,同时电机的定子电阻对系统的动态特性影响较小,将电机的定子电阻 R_s 确定为0。

[0123] 电机的状态预测方程为:

$$[0124] \quad E_d(k|k-1) = \left(1 - \frac{T_s * X}{T_{d0} * X'}\right) E_d(k-1) + T_s * w_B * s(k-1) * E_q(k-1) + \frac{T_s * (X - X')}{T_{d0} * X'} * U_{Ld}(k-1)$$

$$[0125] \quad E_q(k|k-1) = -T_s * w_B * s(k-1) * E_d(k-1) + \left(1 - \frac{T_s * X}{T_{d0} * X'}\right) E_q(k-1) + \frac{T_s * (X - X')}{T_{d0} * X'} * U_{Lq}(k-1)$$

$$[0126] \quad s(k|k-1) = s(k-1) + \frac{T_s}{T_j} (K_L (a + (1-a)(1-s(k-1))^{MP}) - \frac{U_{Lq}(k-1)E_d(k-1) - U_{Ld}(k-1)E_q(k-1)}{X'})$$

[0127] 式中, E_d 是电机的次暂态电势在d轴的分量, E_q 是电机的次暂态电势在q轴的分量, s 是电机的转差率; T_s 为采样周期, w_B 为同步角速度; T_{d0} 为暂态开路时间常数, X 为转子开路电抗, X' 为转子不动时短路电抗; K_L 为电机的负荷率, a 为电机恒定转矩系数, MP 与转速有关的转矩的方次; U_{Ld} 、 U_{Lq} 分别为母线电压在d、q轴的分量。

[0128] 状态协方差预测方程:

$$[0129] \quad P(k|k-1) = F(k-1) P(k-1) F(k-1)^T + Q(k-1)$$

[0130] 其中, Q 为过程噪声协方差矩阵,

$$[0131] \quad F(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s * X}{T_{d0} * X'} & T_s * w_B * s(k-1) & T_s * w_B * E_q(k-1) \\ -T_s * w_B * s(k-1) & 1 - \frac{T_s * X}{T_{d0} * X'} & -T_s * w_B * E_d(k-1) \\ \frac{T_s * U_{Lq}(k-1)}{T_j * X'} & \frac{T_s * U_{Ld}(k-1)}{T_j * X'} & 1 + \frac{1.7 * T_s * K_L * (1 - s(k-1))}{T_j} \end{bmatrix}$$

[0132] 量测预测方程为:

$$[0133] \quad P_M(k|k-1) = \frac{U_{Lq}(k)E_d(k|k-1) - U_{Ld}(k)E_q(k|k-1)}{X'}$$

$$[0134] \quad Q_M(k|k-1) = \frac{U_{Ld}(k)^2 + U_{Lq}(k)^2 - U_{Ld}(k)E_d(k|k-1) - U_{Lq}(k)E_q(k|k-1)}{X'}$$

[0135] 新息协方差方程为:

$$[0136] \quad S(k) = H(k) P(k|k-1) * H(k)^T + R(k)$$

[0137] 式中, R 为量测噪声协方差矩阵,

$$[0138] \quad H(k) = \begin{bmatrix} \frac{U_{Lq}(k)}{X'} & -\frac{U_{Ld}(k)}{X'} & 0 \\ -\frac{U_{Ld}(k)}{X'} & -\frac{U_{Lq}(k)}{X'} & 0 \end{bmatrix}$$

[0139] 滤波增益矩阵方程

$$[0140] \quad W(k) = P(k|k-1) H(k)^T S(k)^{-1}$$

[0141] 状态更新方程与状态协方差更新方程

$$[0142] \quad x(k) = \hat{x}(k|k-1) + W(k)\gamma(k)$$

[0143] 新息方程为:

$$[0144] \quad \gamma(k) = \begin{bmatrix} P_M(k)/ST \\ Q_M(k)/ST \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_M(k|k-1) \\ Q_M(k|k-1) \end{bmatrix}$$

$$[0145] \quad P_M(k) = P_L(k) - P_d(k) - P_s(k)$$

$$[0146] \quad Q_M(k) = Q_L(k) - Q_d(k) - Q_s(k)$$

[0147] 式中, P_M 、 Q_M 分别是通过对量测数据计算获得的电机的有功无功数值; P_L 、 Q_L 分别是量测的总体的负荷有功无功数值; P_d 、 Q_d 分别是配电网的有功无功数值; P_s 、 Q_s 分别是静负荷的有功无功数值; ST 为电机容量基准值与系统容量基准值的比值, $ST = \frac{K_{pm} * P_{L0}}{K_L * U_{L0}}$, K_{pm} 为电

机的比例, P_{L0} 负荷初始功率, U_{L0} 是初始电压。

[0148] 状态协方差更新方程

$$[0149] \quad P(k) = P(k|k-1) - W(k) S(k) W(k)^T$$

[0150] 所述步骤五中模型权重计算公式如下:

[0151] 似然函数计算:

$$[0152] \quad A_i = \frac{\exp(-0.5\gamma_i^T S_i(k)^{-1} \gamma_i)}{\sqrt{|2\pi S_i(k)|}}$$

$$[0153] \quad u_j(k) = \frac{1}{C} A_j c_j$$

[0154] 其中,

$$[0155] \quad C = \sum_{i=1}^N A_i * c_i$$

[0156] γ_i 是第*i*个模型的信息误差, S_i 是第*i*个模型的新息协方差矩阵, A_i 是第*i*个模型的似然函数值, u_j 是第*j*个模型的权重。

[0157] 所述步骤六中模型综合输出公式如下:

[0158] 通过模型的状态变量计算各个模型的功率吸收的公式如下:

$$[0159] \quad P_M(k|k) = ST * \frac{U_{Lq}(k) * E_d(k) - U_{Ld}(k) * E_q(k)}{X'}$$

$$[0160] \quad Q_M(k|k) = ST * \frac{U_{Ld}(k)^2 + U_{Lq}(k)^2 - U_{Ld}(k) * E_d(k) - U_{Lq}(k) * E_q(k)}{X'}$$

$$[0161] \quad P(k) = P_M(k|k) + P_d(k) + P_s(k)$$

$$[0162] \quad Q(k) = Q_M(k|k) + Q_d(k) + Q_s(k)$$

[0163] 其中, P_M 、 Q_M 分别为计算出的电机的有功无功; P_d 、 Q_d 分别为计算出的配电网的有功无功; P_s 、 Q_s 分别为计算出的静负荷的有功无功; P 、 Q 分别为计算出的整个模型的有功无功。

[0164] 通过对各个模型的功率的加权求和获得模型集的功率。

$$[0165] \quad y(k) = \sum_{i=1}^3 y_i(k) u_i(k)$$

[0166] 式中，

$$[0167] \quad y_i(k) = \begin{bmatrix} P_i(k) \\ Q_i(k) \end{bmatrix}; \quad y(k) = \begin{bmatrix} P_z(k) \\ Q_z(k) \end{bmatrix}。P_i、Q_i 分别为第 i 个模型的有功无功；P_z、Q_z 为整个模型集的功率。$$

型集的功率。

[0168] 所述步骤一中的模型结构选择SLM结构。

[0169] 所述步骤一中，模型集记为：[Model_L Model_C Model_R]。

[0170] 所述步骤二、三、四、五、六中，电力负荷的递推建模均在MATLAB仿真平台中完成。

[0171] 为了更好的说明本发明，更为详细的说明为：

[0172] 如图1所示，设在k时刻对电力负荷进行递推建模：

[0173] $X_L(k-1)$ 、 $X_C(k-1)$ 、 $X_R(k-1)$ 分别是第一级模型集中3个模型在k-1时刻的状态变量； $P_L(k-1)$ 、 $P_C(k-1)$ 、 $P_R(k-1)$ 分别是模型在k-1时刻的状态协方差矩阵； $u(k-1)$ 为模型在k-1时刻的权重。通过步骤三中模型交互的公式进行模型的状态变量与协方差矩阵交互，获得交互后的模型的状态变量 $X_{Le}(k-1)$ 、 $X_{Ce}(k-1)$ 、 $X_{Re}(k-1)$ 以及模型的协方差矩阵 $P_{Le}(k-1)$ 、 $P_{Ce}(k-1)$ 、 $P_{Re}(k-1)$ 。然后分别将各个模型对应的状态变量和协方差矩阵输入各自的扩展卡尔曼滤波器进行模型的状态估计，状态估计按步骤四中的公式进行。得到模型估计的k时刻的状态变量 $X_L(k)$ 、 $X_C(k)$ 、 $X_R(k)$ 以及模型的协方差矩阵 $P_L(k)$ 、 $P_C(k)$ 、 $P_R(k)$ 。协方差矩阵用于下一时刻的状态估计过程。模型状态估计过程的似然函数值是 $A_L(k)$ 、 $A_C(k)$ 、 $A_R(k)$ ；信息协方差矩阵是 $S_L(k)$ 、 $S_C(k)$ 、 $S_R(k)$ 。根据这些数据利用步骤五中的公式计算模型的权重。模型的权重用于下一时刻的状态交互以及当前时刻的模型功率输出融合。根据各个模型状态估计过程的似然函数值 $A_L(k)$ 、 $A_C(k)$ 、 $A_R(k)$ 判断模型是否需要调整，如果模型需要调整则利用对应的第二级模型集中的子模型集通过步骤二的公式进行调整，调整后的模型参数用于下一时刻模型的计算；如果模型不需要调整，则保持不变。根据步骤六中的公式利用各个模型的状态变量的估计值计算当前时刻的模型的功率。根据各个模型的权重将各个模型的功率加权求和，所得结果作为模型集的整体功率吸收情况。

[0174] 图2所示为通过利用第二级中的子模型集对相应的第一级模型进行参数调整的算法的结构图。如果模型误差在一段时间内大于阈值，则按图2所示对模型进行参数调整。 $x(k-1)$ 是需要调整的模型在k-1时刻的状态变量，利用这一状态变量对子模型集中的每个模型求取功率并计算其相应的误差。根据模型集上一次调整时的子模型的权重情况分配各个模型的位置，权重值越大的位置，对应的模型似然函数值越大。再根据步骤二中相应的公式计算各个模型的权重值，通过将各个子模型加权求和得到对应的上一级模型的参数。

[0175] 图3所示为两层模型集中负荷模型的基本结构：SLM结构。本模型结构计及了配电网的作用，包含电动机模型和静负荷模型。静模型采用幂函数模型，电机模型采用3阶动态模型。

[0176] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述，但并非对本发明保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本发明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发明的保护范围以内。

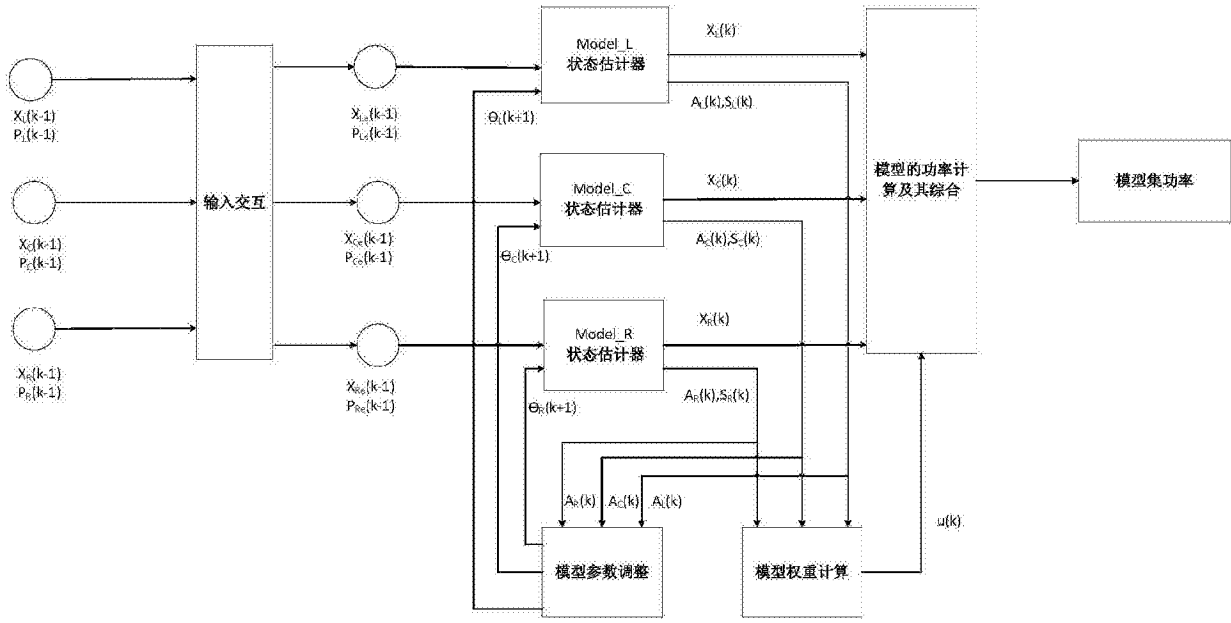


图1

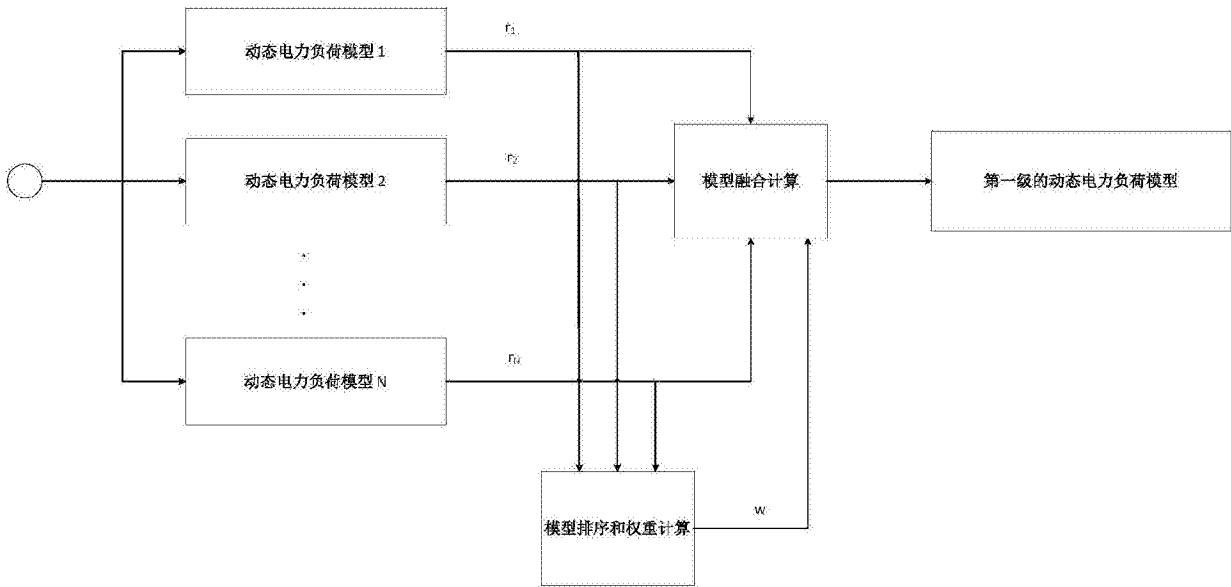


图2

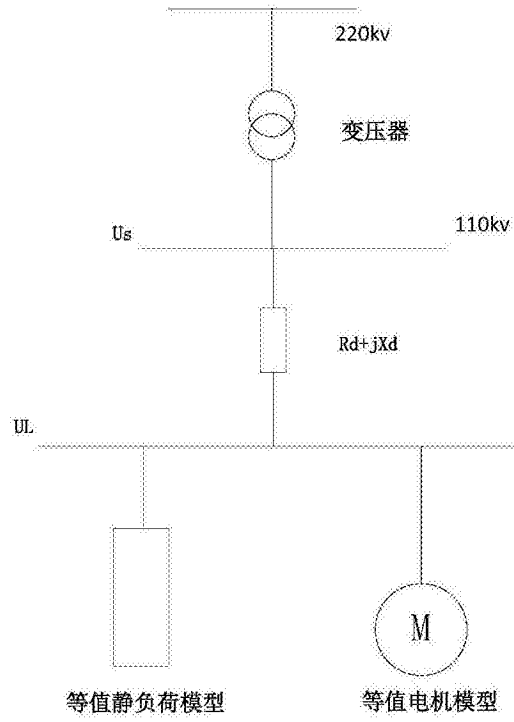


图3