

基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测器设计

马建¹, 窦晓波², 陈克绪¹, 焦阳², 葛浦东²

(1. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:传统电力系统大多采用统一的控制和管理,对量测设备和通信设施依赖性强。一旦发生通信延时、丢包等故障,会影响系统状态监测和系统控制。因此,针对分布式电源接入的配电网系统,提出了一种基于卡尔曼滤波算法的无通信网络信息观测器,其可以实现对系统节点电压和分布式电源本地信息无通信信息观测。仿真分析结果验证了所提观测器的有效性。

关键词:电力系统;通信;监测;卡尔曼滤波;信息量测;网络信息观测器

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909037

0 引言

电力系统是一个典型的非线性动态系统,系统内包括电压、电流、相位在内的所有状态量都是时变量,因此对电力系统进行实时、准确的状态检测以及进一步的控制需要动态的网络拓扑和大量的实时量测数据^[1]。高精度的互感器虽然可以提高实时数据的准确性,但是会带来高昂的成本,因而目前无法大量普及。配电网自动化水平较低,量测装置少和接入其中的分布式电源增加了电网拓扑的复杂性和动态性,因此现阶段的电网状态检测和系统控制依赖于统一的控制和管理^[2]。

针对对象是电力系统的网络信息观测算法,现有理论很难得到最优解,但是很多学者提出了次优代替的近似方法,其中在工程中应用最广泛的方法是扩展卡尔曼滤波EKF(Extended Kalman Filtering)算法。EKF算法通过忽略非线性函数泰勒展开的高阶项,用一阶项近似代替从而将非线性问题线性化进行滤波。文献[3]采用EKF算法检测状态方程的误差对电网信息进行预测和估计,但是当电力系统出现负载扰动或者网络拓扑参数扰动时,会对预测精度带来很大影响。文献[4]基于EKF算法提出了鲁棒卡尔曼算法,增强了系统观测的抗干扰能力,提高了估计精度。但是EKF算法的线性化过程随着系统阶数增加和迭代过程,会产生较大的误差甚至出现滤波发散,因此有学者提出采用无迹卡尔曼滤波UKF(Unscented Kalman Filtering)算法^[5]。UKF算法相比EKF算法估计精度更高,且数值稳定性好。

收稿日期:2018-10-19; **修回日期:**2019-05-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777031);国网江西省电力有限公司科技项目(52182016001B)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777031) and the Science and Technology Program of State Grid Jiangxi Electric Power Company(5218-2016001B)

上述观测算法的实现都依赖于能量管理系统(EMS)获得整个系统的量测信息,进而监测系统实时状态,随着电力系统网络拓扑的扩大和分布式电源接入,这类方法带来了严重的通信负担。与此同时,通信系统不可避免地会产生数据丢包、通信延迟等问题,对电网状态检测和系统控制带来负面影响,甚至影响电网运行的可靠性和稳定性。

为了减轻通信负担,同时保证电网状态监测和系统控制能够获取足够的状态量,国内外很多学者将研究重心放在了电网信息观测,尤其是含分布式电源的网络信息观测。利用状态观测器得到系统状态量,有利于更加灵活、可靠地进行电网状态监测和系统控制^[6]。

文献[7]基于EKF算法和电力系统同步相量测量单元PMU(Phase Measurement Unit),提出一种分布式状态估计方法,首先对大系统进行区域分解,然后对每个子系统进行状态观测。文献[8]提出了一种基于置信传递算法的配电系统状态观测器,此方法结合量测值和智能电表中的数据,计算所需要的状态变量后验估计。该算法可以有效连接传统能量管理系统和用户群体,在一定程度上减轻了通信负担。文献[9]提出一种区域本地状态观测算法,并基于最小二乘法估计区域边界状态,最后采用带约束关系的卡尔曼算法进行修正。文献[10]基于容积卡尔曼滤波CKF(Cubature Kalman Filtering)算法提出一种多区域并行状态观测算法,每个子区域基于CKF独立计算区域状态。文献[9-10]中所需数据较少,但是仍然需要一个集中式管理系统对子区域进行统一管理和下发指令。文献[11]提出了一种基于卡尔曼滤波算法的本地状态观测器,用于估计本地参数,包括线路电流、汇入的节点电流等。该方法用一个虚拟扰动模型等效了研究对象除子系统以外的所有网络拓扑。但是由于该方法并未考虑其他拓扑的网络模型,因此无法估计网络电压和其他子系统

内部信息。

为了适应分布式电源大量接入电力系统,文献[12]考虑了光伏接入的影响,建立了一个量测装置双层优化模型,以量测装置配置个数最少、经济最优为目标实现了对子系统的状态估计。文献[13]对分布式电源按照各自特点建立模型,重点解决了分布式电源接入中低压配电网带来的三相不平衡问题。文献[14]提出一种区域本地状态观测器,区域间只需要将本地估计信息传递给其他区域,而不用传递整个系统的状态观测信息,降低了计算复杂度,减轻了通信压力。

上述文献丰富了电网信息观测的研究成果,但是仍然存在以下不足:①仍然需要集中式的控制中心收集和协调各子系统、子区域的状态估计值;②设计状态观测器时没有充分考虑分布式电源自身的控制和未知扰动对其的影响。本文将针对以上问题设计一种基于卡尔曼滤波算法的无通信状态观测器。通过本地量测的电压、电流信息,在无通信条件下动态估计网络信息和接入的分布式电源状态信息,避免了传统观测器的状态估计受到安装位置和通信延迟的影响,便于提升整体系统中二次控制的动态性能。

1 含分布式电源的网络建模

系统动态模型对电网信息观测的实现尤为重要。由于本文重点为观测器设计部分,不深究分布式电源的具体控制,因此在建立小信号模型过程中不考虑分布式电源的双环控制策略,更多关注网络动态和扰动分析。图1给出了传统控制方法中基于通信设施的系统网络信息观测方案。

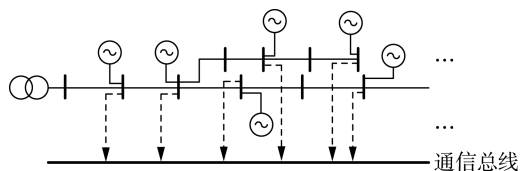


图1 基于通信设施的电网信息观测

Fig.1 Observation of network information based on communication facilities

由图1可知,在每个节点和分布式电源的出口端线路上均需安装互感器,然后将所有电气量信息汇总至通信总线,经过一系列状态估计、状态分析后,下发控制指令。一旦在通信过程中发生了通信延时、丢包等问题,会导致下发指令不可靠,严重时甚至导致控制失效。另外,大规模铺设通信线路也会提高成本。

针对上述问题,本文提出一种基于卡尔曼滤波算法的无通信网络信息观测器。基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测方案见图2。为了准确估计系统

信息,首先需要考虑网络各节点电压动态特性和扰动特性建立小信号模型,其中分布式发电机(DG)的小信号模型由可控电压源表示,并假定电流控制器和电压控制器具有比功率控制器快得多的速度;然后根据建立的小信号模型开发一种基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测器,以获取电网信息。本文所提算法利用每个DG单元的本地信息,观测其余DG单元的动态响应和网络节点电压,无需其他通信支撑。

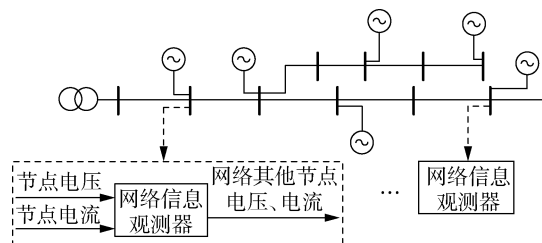


图2 基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测方案

Fig.2 Network information observation scheme based on Kalman filtering algorithm

下面以含分布式电源的3机系统为例建立系统小信号模型,并在此基础上分析基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测器原理。含DG的3机网络拓扑如图3所示,其为一个包含了线路、负载参数的3机网络拓扑模型。

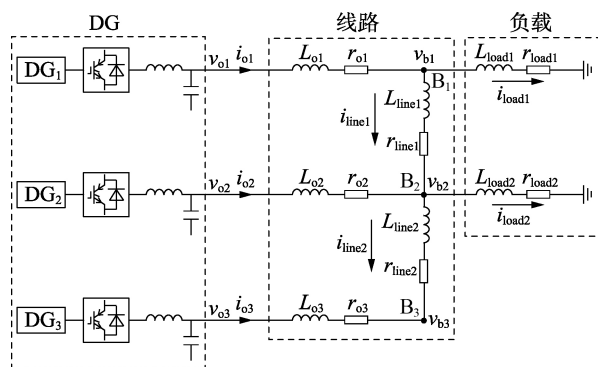


图3 含DG的3机网络拓扑

Fig.3 Network topology with three DGs

图中, $L_{oi}, r_{oi} (i=1, 2, 3)$ 分别为DG接入至母线节点的线路电感和电阻; $L_{linei}, r_{linei} (i=1, 2)$ 分别为母线节点之间的线路电感和电阻; $L_{loadi}, r_{loadi} (i=1, 2)$ 分别为负荷的电感和电阻; $v_{bi} (i=1, 2, 3)$ 为节点 B_i 母线电压, B_1, B_2 处各接有1个负载; $v_{oi}, i_{oi} (i=1, 2, 3)$ 分别为逆变器输出端电压和端电流;电网中的每个DG电源通过1个变流器(通常是DC/AC逆变器)、1个LC型滤波器和1个RL等效阻抗对外输出,线路参数、负载参数均用RL阻抗等效。

图3所示的含DG的网络结构大致分为DG单元、线路模型和负载模型三部分。需要注意的是,每台逆变器的动态特性都经过dq变换工作在自身的

角频率 ω_i 下,为了使所有 DG 单元、线路和负载之间的坐标系一致,需要将其中 1 个 DG 单元的参考系视为公共角频率 ω_{com} ,并将其他变量都转换到这个公共 DQ 参考系下。

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_i & -\sin \delta_i \\ -\sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\delta_i = \int (\omega_i - \omega_{\text{com}}) dt + \delta_0 \quad (2)$$

其中, δ_i 和 δ_0 分别为第 i 个 DG 参考系和公共参考系之间的实时相角差和初始相角差; f_d 、 f_q 为公共 DQ 参考系下的电气量; f_d 、 f_q 为 dq 参考系下的电气量。相应地,采用式(1)的逆形式可以实现从公共参考系转换回第 i 个 DG 单元自身的 dq 参考系。

下面对照上述 3 个子模型进行整体网络拓扑建模。

(1) DG 单元。

一般而言,逆变器控制策略中包含 3 个控制回路:下垂控制回路、电压外环控制回路和电流内环控制回路。其中,LC 滤波器和电压电流控制回路需要有比下垂控制回路更快的动态特性。因此本文构建模型时仅考虑功率控制器,忽略了其他 3 个回路的动态特性。功率控制器通常采用下垂原理进行控制,下垂原理中有功功率 P_i 和角频率 ω_i 之间的关系,以及无功功率 Q_i 和端电压参考值 v_{oi}^* 之间的关系如下:

$$\omega_i = \omega_{ni} - m_{pi} P_i \quad (3)$$

$$v_{odi}^* = V_{ni} - n_{qi} Q_i \quad (4)$$

$$v_{oqi}^* = 0 \quad (5)$$

其中, ω_{ni} 为下垂控制中关于角频率的参考值; m_{pi} 为频率下垂的系数; v_{odi}^* 、 v_{oqi}^* 分别为端电压参考值的 d 轴和 q 轴分量; V_{ni} 为下垂控制中关于电压的参考值; n_{qi} 为电压下垂的系数。

在功率控制器中,有功和无功的输出值由截止频率为 ω_{ci} 的低通滤波器提供:

$$P_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{odi} i_{odi} + v_{oqi} i_{oqi}) \quad (6)$$

$$Q_i = \frac{\omega_{ci}}{s + \omega_{ci}} (v_{odi} i_{odi} - v_{oqi} i_{oqi}) \quad (7)$$

其中, v_{odi} 和 v_{oqi} 分别为逆变器输出端电压 v_{oi} 的 d 轴和 q 轴分量; i_{odi} 和 i_{oqi} 分别为逆变器输出端电流 i_{oi} 的 d 轴和 q 轴的分量; s 为微分算子。

联立式(4)和式(7)并线性化可以得到关于电压的小信号模型:

$$\Delta \dot{v}_{odi}^* = -n_{qi} \omega_{ci} \Delta (v_{odi} i_{odi} - v_{oqi} i_{odi}) - \omega_{ci} v_{odi}^* \quad (8)$$

根据基尔霍夫电流定律(KCL),结合图 3 所示的网络拓扑结构,可以得到第 i 个逆变器在 dq 参考系下的输出电流动态响应为:

$$\dot{i}_{odi} = -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} i_{odi} - \omega_i i_{oqi} + \frac{1}{L_{oi}} v_{odi} - \frac{1}{L_{oi}} v_{bDi} \quad (9)$$

$$\dot{i}_{oqi} = -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} i_{oqi} - \omega_i i_{odi} + \frac{1}{L_{oi}} v_{oqi} - \frac{1}{L_{oi}} v_{bQi} \quad (10)$$

其中, v_{bDi} 、 v_{bQi} 为节点母线电压 v_{bi} 在公共 DQ 参考系下的分量。

同样将其表示成小信号模型为:

$$\Delta \dot{\mathbf{i}}_{odqi} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} & -\omega_i \\ \omega_i & -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{i}_{odqi} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{oi}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{oi}} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{odqi} + \begin{bmatrix} -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} & \omega_i \\ \omega_i & -\frac{r_{oi}}{L_{oi}} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{i}_{odqi} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{oi}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{oi}} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{v}_{bDQi} \quad (11)$$

由于前文已经分析过,电压、电流双环控制过程比下垂控制的动态性能快得多,因此考虑功率控制器、LC 滤波器和输出侧的 RL 阻抗模型,结合式(2)—(11)可得到第 i 个 DG 单元的小信号动态模型为:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_{invi} = \mathbf{A}_{invi} \Delta \mathbf{x}_{invi} + \mathbf{B}_{invi} \Delta \mathbf{v}_{bi} \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{x}_{invi} = [\Delta \delta_i \quad \Delta P_i \quad \Delta Q_i \quad \Delta v_{odi} \quad \Delta i_{odi} \quad \Delta i_{oqi}]^T$$

$$\mathbf{A}_{invi} = \begin{bmatrix} 0 & A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & A_3 & A_4 \\ 0 & 0 & A_5 & A_6 \\ 0 & L_1 & L_2 & L_3 \end{bmatrix}_{6 \times 6}, \quad \mathbf{B}_{invi} = \begin{bmatrix} 0 \\ L_4 \end{bmatrix}_{6 \times 2}$$

$$A_1 = [m_{pi} \quad 0], \quad A_2 = \begin{bmatrix} -\omega_c & 0 \\ 0 & -\omega_c \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} \omega_i i_{odi} \\ \omega_i i_{oqi} \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \omega_i v_{odi} & \omega_i v_{oqi} \\ -\omega_i v_{oqi} & \omega_i v_{odi} \end{bmatrix}, \quad A_5 = [-\omega_i - n_{qi} \omega_i i_{oqi}]$$

$$A_6 = [n_{qi} \omega_i v_{oqi} \quad -n_{qi} \omega_i v_{odi}], \quad L_1 = \begin{bmatrix} m_{pi} i_{oqi} \\ -m_{pi} i_{odi} \end{bmatrix}$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{oi}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{oi}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{oi}} \end{bmatrix}, \quad L_4 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{oi}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{oi}} \end{bmatrix}$$

(2) 线路模型。

在 3 个母线节点之间存在 2 条连接线路,线路参数采用 RL 阻抗模型,在公共 DQ 参考系下,根据 KCL 可知,母线节点 B_1 和母线节点 B_2 的连接线上有以下电气联系:

$$\begin{cases} \Delta \dot{i}_{lineD1} = -\frac{r_{line1}}{L_{line1}} \Delta i_{lineD1} + \frac{\Delta v_{bD1} - \Delta v_{bD2}}{L_{line1}} + \omega_{\text{com}} \Delta i_{lineQ1} \\ \Delta \dot{i}_{lineQ1} = -\frac{r_{line1}}{L_{line1}} \Delta i_{lineQ1} + \frac{\Delta v_{bQ1} - \Delta v_{bQ2}}{L_{line1}} - \omega_{\text{com}} \Delta i_{lineD1} \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)扩展至整个网络,并整理成状态空间

方程的形式,如下:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{line}DQ} &= \mathbf{A}_{\text{line}} \Delta \mathbf{i}_{\text{line}DQ} + \mathbf{B}_{\text{line}} \Delta \mathbf{v}_{bDQ} \quad (14) \\ \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{line}DQ} &= \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{line}DQ1} & \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{line}DQ2} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{A}_{\text{line}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{line}1} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{\text{line}2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\text{line}i} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{\text{line}i}}{L_{\text{line}i}} & \omega_{\text{com}} \\ \omega_{\text{com}} & -\frac{r_{\text{line}i}}{L_{\text{line}i}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{\text{line}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{line}1} \\ \mathbf{B}_{\text{line}2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{line}i} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\text{line}i}} & 0 & -\frac{1}{L_{\text{line}i}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{\text{line}i}} & 0 & -\frac{1}{L_{\text{line}i}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中, $i=1,2$ 。

(3) 负载侧模型。

和线路侧模型类似,同样运用KCL可以对负载1建立模型如下:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}D1} = -\frac{r_{\text{load}1}}{L_{\text{load}1}} \Delta \mathbf{i}_{\text{load}D1} + \frac{\Delta \mathbf{v}_{bD1}}{L_{\text{load}1}} + \omega_{\text{com}} \Delta \mathbf{i}_{\text{load}D1} \\ \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}Q1} = -\frac{r_{\text{load}1}}{L_{\text{load}1}} \Delta \mathbf{i}_{\text{load}Q1} + \frac{\Delta \mathbf{v}_{bQ1}}{L_{\text{load}1}} - \omega_{\text{com}} \Delta \mathbf{i}_{\text{load}D1} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)扩展至整个网络,并整理成状态空间方程的形式如下:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}DQ} &= \mathbf{A}_{\text{load}} \Delta \mathbf{i}_{\text{load}DQ} + \mathbf{B}_{\text{load}} \Delta \mathbf{v}_{bDQ} \quad (16) \\ \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}DQ} &= \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}DQ1} & \Delta \dot{\mathbf{i}}_{\text{load}DQ2} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{A}_{\text{load}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{load}1} & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{\text{load}2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\text{load}i} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{\text{load}i}}{L_{\text{load}i}} & \omega_{\text{com}} \\ \omega_{\text{com}} & -\frac{r_{\text{load}i}}{L_{\text{load}i}} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_{\text{load}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{\text{load}1} \\ \mathbf{B}_{\text{load}2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{load}i} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{\text{load}i}} & 0 & -\frac{1}{L_{\text{load}i}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{\text{load}i}} & 0 & -\frac{1}{L_{\text{load}i}} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

其中, $i=1,2$ 。

根据上述线路、负载模型的状态空间表达式, $\mathbf{v}_{bDQ}$ 可以看成是一个输入量,而实际上每个节点电压的值都与线路电流、线路参数、负载电流和负载参数相关,由图3所示的网络拓扑图,根据KCL给出3个母线节点的电压表达式:

$$\begin{cases} v_{b1} = r_{\text{load}1} (i_{o1} - i_{\text{line}1}) + L_{\text{load}1} \frac{d(i_{o1} - i_{\text{line}1})}{dt} \\ v_{b2} = r_{\text{load}2} (i_{o2} + i_{\text{line}1} - i_{\text{line}2}) + L_{\text{load}2} \frac{d(i_{o2} + i_{\text{line}1} - i_{\text{line}2})}{dt} \\ v_{b3} = v_{b2} - r_{\text{line}2} i_{\text{line}2} - L_{\text{line}2} \frac{di_{\text{line}2}}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

将其转换到公共DQ参考系下有:

$$\begin{cases} v_{bD1} = r_{\text{load}1} (i_{oD1} - i_{\text{line}D1}) + L_{\text{load}D1} \left[\frac{d(i_{oD1} - i_{\text{line}D1})}{dt} - \omega_{\text{com}} (i_{oQ1} - i_{\text{line}Q1}) \right] \\ v_{bQ1} = r_{\text{load}1} (i_{oQ1} - i_{\text{line}Q1}) + L_{\text{load}Q1} \left[\frac{d(i_{oQ1} - i_{\text{line}Q1})}{dt} + \omega_{\text{com}} (i_{oD1} - i_{\text{line}D1}) \right] \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} v_{bD2} = r_{\text{load}2} (i_{oD2} + i_{\text{line}D1} - i_{\text{line}D2}) + L_{\text{load}2} \left[\frac{d(i_{oD2} + i_{\text{line}D1} - i_{\text{line}D2})}{dt} - \omega_{\text{com}} (i_{oQ2} + i_{\text{line}Q1} - i_{\text{line}Q2}) \right] \\ v_{bQ2} = r_{\text{load}2} (i_{oQ2} + i_{\text{line}Q1} - i_{\text{line}Q2}) + L_{\text{load}2} \left[\frac{d(i_{oQ2} + i_{\text{line}Q1} - i_{\text{line}Q2})}{dt} + \omega_{\text{com}} (i_{oD2} + i_{\text{line}D1} - i_{\text{line}D2}) \right] \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} v_{bD3} = v_{bD2} - r_{\text{line}2} i_{\text{line}D2} - L_{\text{line}2} \left(\frac{di_{\text{line}D2}}{dt} - \omega_{\text{com}} i_{\text{line}Q2} \right) \\ v_{bQ3} = v_{bQ2} - r_{\text{line}2} i_{\text{line}Q2} - L_{\text{line}2} \left(\frac{di_{\text{line}Q2}}{dt} + \omega_{\text{com}} i_{\text{line}D2} \right) \end{cases} \quad (20)$$

联立式(18)~(20),可以得到关于节点电压的小信号模型函数表达式:

$$\Delta \mathbf{v}_{bDQ} = \mathbf{f}_b \left(\Delta \mathbf{i}_{\text{line}DQ}, \Delta \mathbf{i}_{oDQ}, \Delta \dot{\mathbf{i}}_{oDQ}, \omega_{\text{com}} \right) \quad (21)$$

其中, $\mathbf{f}_b$ 为节点母线电压向量 $\Delta \mathbf{v}_{bDQ}$ 对向量 $\Delta \mathbf{i}_{oDQ}$ 、 $\Delta \dot{\mathbf{i}}_{oDQ}$ 和 ω_{com} 的线性函数关系。

将式(21)代入式(12)、(14)、(16)即可得到完整的3机网络的动态小信号模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (22)$$

其中,完整的状态变量 $\mathbf{x} = [x_{\text{inv}1} \ x_{\text{inv}2} \ x_{\text{inv}3} \ i_{\text{line}1} \ i_{\text{line}2} \ i_{\text{load}1} \ i_{\text{load}2}]^T$, $\mathbf{y}_i$ 为从第 i 个DG单元的本地电压、电流输出测量,同时各DG单元的输出矩阵可由以上公式确定。

2 基于卡尔曼滤波算法的网络信息观测器

根据图3中的网络拓扑模型,可以进一步设计网络信息观测器,本节将基于卡尔曼滤波器详细介绍观测器的原理。电网中存在不可测量的量或不易测量的量,同时由于扰动的不确定也无法直接测量,但这些量会通过网络拓扑表现出来,它们会影响量测量的信息,这里指的是每个DG单元或网络节点的本地电压和电流信息。因此,可以通过本地电压、电流信息连续、实时更新网络内其他节点的观测值,即可以实现利用DG单元自身的本地信息动态、实

时估计整个网络的电气量信息。其中观测器采用卡尔曼滤波器,因为卡尔曼滤波器在实现网络信息观测的同时,具备较好的噪声抑制能力。这里采用的滤波器实际上是一个线性卡尔曼滤波器,通过已知量测信息更新未知的估计值,由于滤波器本身是线性的,可以更快地跟踪网络中电气量的变化,也便于工程应用中的数字实现。

在设计网络信息观测器之前,首先需要对第 1 节中的网络模型进行离散化,采用欧拉方程对式(22)进行离散化,可以得到离散时间小信号模型为:

$$\Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \Delta \mathbf{x}(k) \quad (23)$$

$$\Delta \mathbf{y}_i(k) = \mathbf{H}_d \Delta \mathbf{x}(k) \quad (24)$$

其中, $\mathbf{A}_d$ 、 $\mathbf{H}_d$ 是通过欧拉离散方程得到的。为了表达简洁化,下文中出现的变量省略增量符号“ Δ ”。

一般而言,参数扰动导致的模型不准确在实际工程中是不可避免的。根据内模原理,扰动模型总是可以叠加在原始模型上,即在原始模型的基础上叠加扰动模型构成新的系统模型。这样可以提高系统鲁棒性和抑制模型不确定性带来的干扰。当参数发生扰动时,扰动模型能够为系统提供更准确的估计,从而为系统无偏控制提供支持。在电网模型中,线路参数扰动、负载参数扰动、扰动位置随机性大、LC 滤波器扰动、输出阻抗扰动和 DG 故障引起的模型不确定,都会影响最后的电网整体控制效果。因此,在考虑扰动模型的基础上,能够准确观测电网信息,对电网监测和控制起到了至关重要的作用。

需要注意的是,这里建立的扰动模型将负载变化等效为一个阶跃变化的扰动源。基于上述分析,下面给出包含输入和输出的离散扰动模型,如式(25)和式(26)所示。

$$\mathbf{x}_{dis}(k+1) = \mathbf{A}_{dis} \mathbf{x}_{dis}(k) + \mathbf{B}_{dis} \boldsymbol{\omega}_{dis}(k) \quad (25)$$

$$\mathbf{i}_{dis}(k) = \mathbf{C}_{dis} \mathbf{x}_{dis}(k) \quad (26)$$

其中, $\mathbf{A}_{dis}$ 、 $\mathbf{B}_{dis}$ 、 $\mathbf{C}_{dis}$ 为参数矩阵,本文中这 3 个参数矩阵值都为 1。

综上所述,含有扰动模型的 3 机网络拓扑模型如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \mathbf{x}_{dis}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{C}_{dis} \\ 0 & \mathbf{A}_{dis} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \mathbf{x}_{dis}(k) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{y}_m(k) = \mathbf{H}_m \mathbf{x}(k) \quad (28)$$

$$\mathbf{y}_{um}(k) = \mathbf{H}_{um} \mathbf{x}(k) \quad (29)$$

其中, $\mathbf{y}_m$ 为可测量量,用于更新估计值, $\mathbf{H}_m$ 为其系数矩阵; $\mathbf{y}_{um}$ 为不可测量量或不易测量量,包括各母线节点电压,可以作为滤波器的输出, $\mathbf{H}_{um}$ 为其系数矩阵。

如上文分析,在电网拓扑中,未知干扰对系统中可测量量和不可测量量的输出都会产生影响,最终

反映到每个观测器的输入量则是 DG 本地的电压、电流信息,因而网络信息观测器可以通过本地信息连续、实时更新系统状态。网络观测器实现原理如图 4 所示,观测器利用本地信息量测信息 $\mathbf{y}_m$ 不断更新估计值,进而估计系统中不可测量量和不易测量量 $\mathbf{y}_{um}$,这里指的是各母线节点的电压。

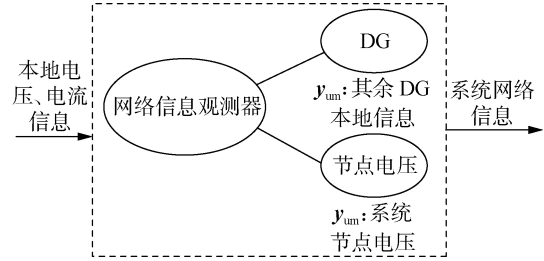


图 4 网络观测器实现原理图

Fig.4 Implementation principle of network observer

图 4 将网络观测器分为 2 个子系统:一部分针对系统母线节点设计,输出量是系统中各母线的节点电压;另一部分是针对系统中所有 DG 设计,其输出量包含了所有 DG 单元的输出端电压、电流估计值。其中,自身的本地信息估计值用于反馈更新、校正,其他 DG 单元的端电压、端电流则可以作为输出量。对比第 1 节中的 DG 单元建模部分,可以发现此时的输出量主要包含 $[v_{od} \ i_{od} \ i_{oq}]$ 。

将式(27)记为如下形式的状态变量表达式:

$$\mathbf{x}_D(k+1) = \mathbf{A}_D \mathbf{x}(k) \quad (30)$$

卡尔曼滤波用于状态估计时,一般从求解系统先验估计和先验估计协方差开始。在这里用作网络信息观测器时,首先求解系统先验估计:

$$\mathbf{x}_D(k+1|k) = \mathbf{A}_D \mathbf{x}(k|k) \quad (31)$$

然后,求解系统先验估计协方差矩阵:

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}_D \mathbf{P}(k|k) \mathbf{A}_D^T + \mathbf{Q} \quad (32)$$

接着,需要定义卡尔曼增益矩阵 $\mathbf{K}$,用于最小化系统实际状态和量测状态之间的均方误差:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{H}_m^T (\mathbf{H}_m \mathbf{P}(k+1|k) \mathbf{H}_m^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (33)$$

解得卡尔曼滤波增益 $\mathbf{K}$ 之后,根据量测值校正先验估计和先验估计协方差:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_D(k+1|k+1) &= \mathbf{x}_D(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1) \times \\ &\quad (\mathbf{y}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{x}_D(k+1|k)) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{H}_m) \mathbf{P}(k+1|k) \quad (35)$$

式(31)~(35)实现了卡尔曼滤波器估计系统状态的过程,此时根据式(29)可以得到滤波器输出值,根据 $\mathbf{H}_{um}$ 的不同,可以得到其他 DG 单元的输出端电压、电流或者系统母线节点电压。

值得注意的是,式(30)中的矩阵 $\mathbf{A}_D$ 是一个定矩阵,这意味着此时的卡尔曼滤波器作用于一个线性

系统,或者说这里的卡尔曼滤波器是一个稳态滤波器。因此上述 5 个步骤的滤波器工作原理可以简化为:

$$\mathbf{x}_D(k+1|k+1) = \mathbf{A}_D \mathbf{x}_D(k|k) + \mathbf{K} (\mathbf{y}_m(k) - \mathbf{H}_m \mathbf{A}_D \mathbf{x}_D(k|k)) \quad (36)$$

这里的卡尔曼滤波增益 $\mathbf{K}$ 是一个定矩阵。之所以考虑采用一个定矩阵 $\mathbf{K}$ 作为卡尔曼滤波增益,是因为网络信息观测器作用于高阶电网系统,过高的阶数对数字实现的存储和计算能力提出了更高的要求。而稳态卡尔曼滤波器的性能与时变滤波器相近,其好处在于无需实时的计算稳态误差协方差和卡尔曼滤波增益矩阵,这将极大地提高滤波器的动态响应。在系统观测中,对象往往是高阶矩阵,这一点显得尤为重要。需要注意的是,稳态滤波器仍是一个动态系统,“稳态”滤波器中的时不变指的是卡尔曼滤波是时不变的,卡尔曼滤波增益采用的是稳态时的滤波增益值。

3 仿真分析

为了验证本文所提网络信息观测器的有效性,在 MATLAB / Simulink 中搭建了含 DG 的三相网络模型,拓扑结构如图 5 所示。

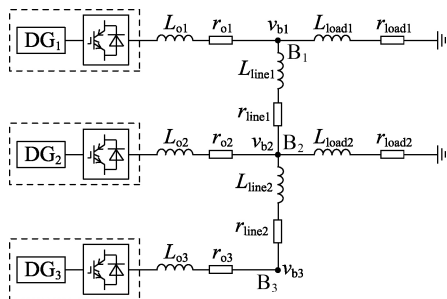


图 5 仿真拓扑结构图

Fig.5 Diagram of simulation topology structure

图 5 所示的网络拓扑中包含了 3 台 DG, 分别为 DG₁ (40 kW, 20 kvar)、DG₂ (30 kW, 15 kvar) 以及 DG₃ (20 kW, 10 kvar); 在母线节点 B₁ 和 B₂ 上分别接有 RL 负载; B₃ 上接有扰动模型; 母线节点之间的线路模型和扰动模型均采用 RL 阻抗模型。具体的 DG 模型参数见表 1, 线路、扰动模型参数见表 2。DG₁、DG₂、DG₃ 的有功功率、无功功率比例为 2:1.5:1。仿真中电网频率参考值定为 50 Hz, 电压幅值定为 380 V。

表 1 DG 模型参数

Table 1 Parameters of DG model

DG	$m_{p_i} / [\text{rad} \cdot (\text{W} \cdot \text{s})^{-1}]$	$n_{q_i} / (\text{V} \cdot \text{var}^{-1})$	r_{o1} / Ω	L_{o1} / mH
DG ₁	10^{-5}	5.0×10^{-4}	0.18	0.32
DG ₂	1.5×10^{-5}	7.5×10^{-4}	0.20	0.48
DG ₃	2.0×10^{-5}	10^{-3}	0.15	0.54

表 2 线路、扰动模型参数

Table 2 Parameters of lines and disturbance model

参数类型	参数	参数值	参数类型	参数	参数值
线路 1 参数	$r_{\text{line1}} / \Omega$	0.2	负荷 2 参数	$r_{\text{load2}} / \Omega$	7.26
	$L_{\text{line1}} / \text{mH}$	0.32		$L_{\text{load2}} / \text{mH}$	23.1
线路 2 参数	$r_{\text{line2}} / \Omega$	0.2	扰动模型	r_{dis1} / Ω	10
	$L_{\text{line2}} / \text{mH}$	0.32		r_{dis2} / Ω	20
负荷 1 参数	$r_{\text{load1}} / \Omega$	7.26		$L_{\text{dis1}} / \text{mH}$	50
	$L_{\text{load1}} / \text{mH}$	23.1		$L_{\text{dis2}} / \text{mH}$	500

仿真中在 DG₁ 处装设网络信息观测器, 估计 DG₂ 和 DG₃ 的出口端电流和母线节点电压。下面进行 4 组仿真算例, 包含了稳态情况和扰动情况, 用于分析所提网络信息观测器的有效性。

(1) 仿真场景 1。

网络信息观测器装设在 DG₁ 处, 因而 DG₁ 的出口端电流、电压为已知值, 不作为观测器输出量。此时观测器关于分布式电源的本地信息输出结果如图 6、7 所示。

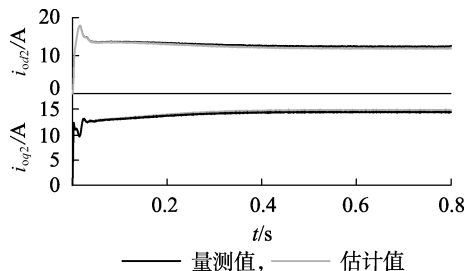


图 6 DG₂ 端电流的 d、q 轴分量的输出结果

Fig.6 Output values of d- and q- axis DG₂ current

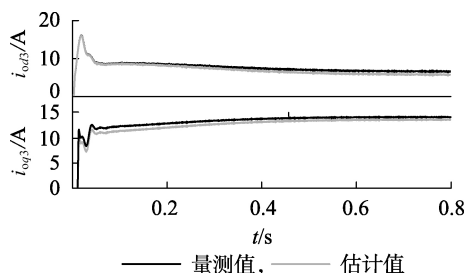


图 7 DG₃ 端电流的 d、q 轴分量的输出结果

Fig.7 Output values of d- and q- axis DG₃ current

由图 6 可见, 经过短暂的动态过程, 观测器关于 DG₂ 的端电流 d 轴和 q 轴分量能实现预计跟踪效果。同样地, 图 7 的输出结果说明观测器对 DG₃ 的电流观测也能实现预计跟踪效果。从这个角度出发, 意味着本地设计的网络信息观测器能实现观测其他分布式电源的本地信息, 即可以实现 DG 之间无通信信息交换。

(2) 仿真场景 2。

为了测试系统内未知扰动对观测器输出的影响, 仿真中在 B₃ 处施加扰动 (10 Ω, 50 mH), 用于观测扰动情况下对 DG₂ 和 DG₃ 的本地信息估计。图 8 给出了观测器关于 DG₂ 端电流的输出结果, 图 9 给出

了观测器关于 DG_3 端电流的输出结果。

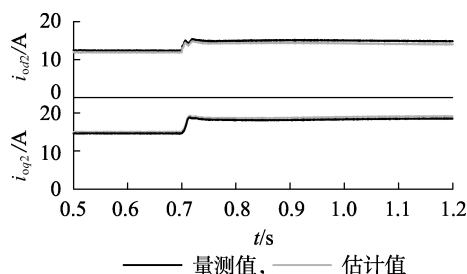


图 8 扰动下 DG_2 端电流的 d 、 q 轴分量的输出结果

Fig.8 Output values of d - and q - axis DG_2 current under disturbance condition

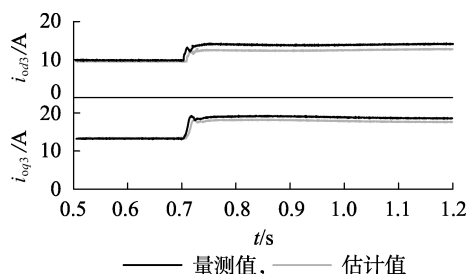


图 9 扰动下 DG_3 端电流的 d 、 q 轴分量的输出结果

Fig.9 Output values of d - and q - axis DG_3 current under disturbance condition

由图中可以看出,在 $t=0.7$ s 处施加扰动, DG 为了追踪负载扰动带来的功率需求,输出电流会增加。图中 DG_2 和 DG_3 的输出端电流在 0.7 s 时上升,此时观测器输出值也随之上升,其稳定值虽存在微小稳态误差,但是可以认为观测器输出结果与真实值是相匹配的。因而可以认为所提网络观测器关于 DG 单元的本地信息观测是有效的。

(3) 仿真场景 3。

为了验证所提网络信息观测器在未知扰动下对系统内节点电压的观测效果,仿真中在母线节点 B_3 处施加扰动 (10Ω , 50 mH), 并且观察 $v_{b1} \sim v_{b3}$ 的观测值。

由于突加负载扰动,根据下垂控制原理,每条总线上的电压均会有所下降,图 10 给出了扰动下 3 个节点电压的变化趋势,结果符合下垂控制原理。

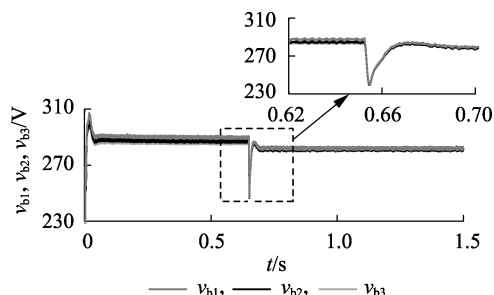


图 10 节点电压实际值

Fig.10 Actual values of node voltages

图 11—13 分别给出了 $v_{b1} \sim v_{b3}$ 的估计值。可以

发现观测器关于节点电压的估计值和实际值吻合, 0.7 s 施加扰动后观测器输出也随之降低,这意味着网络信息观测器可以实现无偏估计系统节点电压。

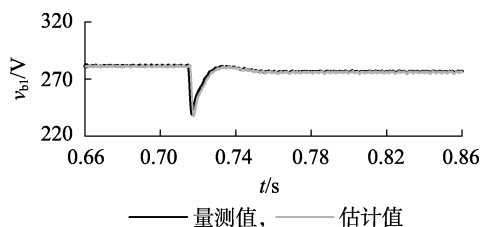


图 11 v_{b1} 输出结果

Fig.11 Output results of v_{b1}

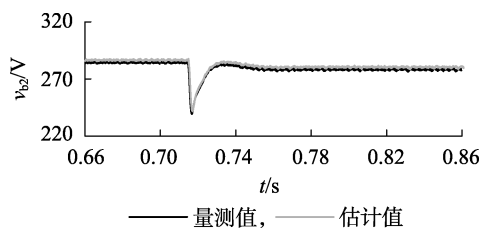


图 12 v_{b2} 输出结果

Fig.12 Output results of v_{b2}

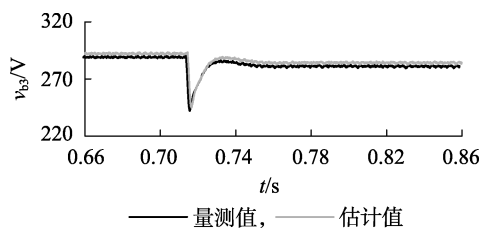


图 13 v_{b3} 输出结果

Fig.13 Output results of v_{b3}

(4) 仿真场景 4。

由于实际工程中,扰动是随机且无法预先评估的,因此仿真场景中采用另一组扰动参数用以验证观测器在未知扰动下的有效性。

图 14 给出了第 2 组扰动参数下,观测器关于节

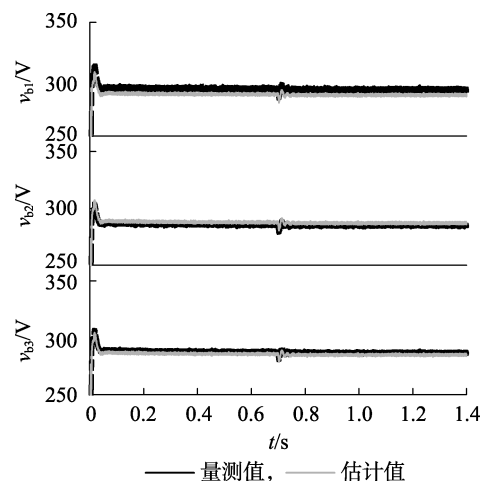


图 14 扰动下节点电压输出结果

Fig.14 Output results of v_{b1} , v_{b2} and v_{b3} under disturbance conditions

点电压的输出结果。在0.7 s施加扰动(20 Ω , 500 mH),根据下垂原理,节点电压均有不同幅度的下降。不同扰动参数下,观测器输出均能无偏跟踪实际母线节点电压,因此可以说明文中所提网络节点电压观测器在未知扰动下依然具有良好的性能。

上述4组仿真算例,验证了所提网络信息观测器的有效性。通过在一个DG单元装设观测器,利用本地电压、电流信息,进而估计整个系统的状态,包括其他DG的本地信息和网络节点电压。从而实现无通信信息交换,避免了通信系统可能带来的影响,有利于提高系统稳定性。

(5)仿真场景5。

为了验证本文所设计的观测器能够避免通信系统带来的影响,同时由于观测数据多用来进行系统的控制,故采用含通信系统的控制系统和含本文观测器的控制系统进行比较,结果如图15所示。本场景以文献[15]中的分布式控制系统为例,通过本文所设计的观测器可以获取控制器所需要的数据,避免通信拓扑对系统控制性能带来影响。

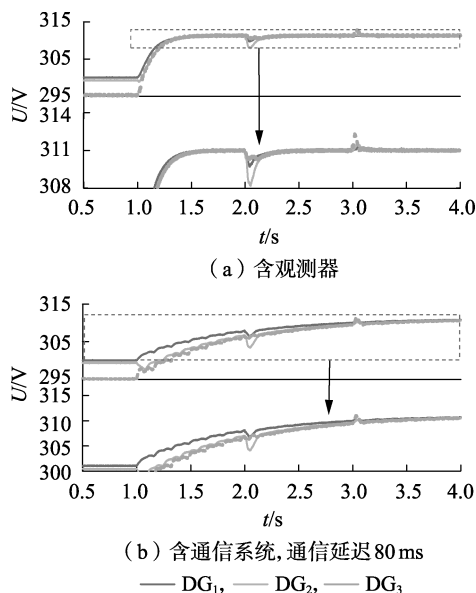


图15 含观测器的系统控制效果

Fig.15 Control effect of system with observers

如图15所示,当负载变化(2 s负荷增加和3 s负荷减少)造成电网中光伏并网节点电压出现波动时,通信延迟会严重影响控制的动态性能,使得电压恢复311 V(1 p.u.)的速度变慢。

4 结论

随着DG大规模接入配电网系统,其分散性和随机性给现代化信息量测体系带来了新的挑战。针对传统电力系统信息交互依赖于通信设施的弊端,本文提出了一种无通信网络信息观测器,可以避免安装位置配置问题和通信故障可能带来的负面影

响。本文首先对含DG的网络拓扑建立小信号模型;然后基于建立的小信号模型设计网络信息观测器,通过卡尔曼滤波算法实现利用本地电压、电流信息估计网络内的动态响应;最后通过仿真分析验证了观测器在稳态和未知扰动下的良好性能,对比分析了控制系统中采用观测器数据观测相比于采用通信系统的优越性,证明了观测器设计的有效性。

参考文献:

- [1] 赵俊博,张葛祥,黄彦全. 含新能源电力系统状态估计研究现状和展望[J]. 电力自动化设备,2014,34(5):7-20,34.
ZHAO Junbo,ZHANG Gexiang,HUANG Yanquan. Status and prospect of state estimation for power system containing renewable energy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(5):7-20,34.
- [2] 张强,张伯明,李鹏. 智能电网调度控制架构和概念发展述评[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):1-6,35.
ZHANG Qiang,ZHANG Boming,LI Peng. Review of structure and concept evolution of dispatch and control system for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12):1-6,35.
- [3] NISHIYA K I,TAKAGI H,HASEGAWA J,et al. Dynamic state estimation for electric power systems—introduction of a trend factor and detection of innovation processes [J]. Electrical Engineering in Japan,1976,96(5):79-87.
- [4] SHIH K R,HUANG S J. Application of a robust algorithm for dynamic state estimation of a power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2002,17(1):141-147.
- [5] WANG Shaobu,GAO Wenzhong,MELIPOULOS A P S. An alternative method for power system dynamic state estimation based on unscented transform[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,27(2):942-950.
- [6] 卢庚,徐铭,林永铎,等. 微电网电力系统状态估计建模及算法比较[J]. 电气应用,2013,32(4):66-69,77.
LU Geng,XU Ming,LIN Yongduo,et al. State estimation model and algorithm comparison of microgrid power system [J]. Electrotechnical Application,2013,32(4):66-69,77.
- [7] DU Pengwei,HUANG Zhengyu,SUN Yannan,et al. Distributed dynamic state estimation with extended Kalman filter [C]//Proceedings of the 43rd North American Power Symposium. Boston,USA:IEEE,2011:1-6.
- [8] HU Ying,KUH A,YANG Tao,et al. A belief propagation based power distribution system state estimator[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine,2011,6(3):36-46.
- [9] 蔡永智,陈皓勇,万楚林. 基于最小二乘估计融合的分布式电力系统动态状态估计[J]. 电力系统自动化,2016,40(8):29-35,113.
CAI Yongzhi,CHEN Haoyong,WAN Chulin. Distributed dynamic state estimation for power systems based on least square estimation fusion[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(8):29-35,113.
- [10] SHARMA A,SRIVASTAVA S C,CHAKRABARTI S. Multi-agent-based dynamic state estimator for multi-area power system [J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(1):131-141.
- [11] LIU J,BENIGNI A,OBRAĐOVIC D,et al. State estimation and branch current learning using independent local Kalman filter with virtual disturbance model[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2011,60(9):3026-3034.

- [12] 宗鹏鹏. 含分布式光伏的主动配电网状态估计研究[D]. 南京:东南大学,2017.
ZONG Pengpeng. Research on state estimation of active distribution network with distributed photovoltaic system[D]. Nanjing:Southeast University,2017.
- [13] 候小虎. 含分布式电源的中低压配电网状态估计研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
HOU Xiaohu. Research on a state estimation of medium and low voltage distribution network with distributed generation [D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2017.
- [14] 孙一冰. 分布式动态状态估计算法及其在电力系统中的应用[D]. 济南:山东大学,2017.
SUN Yibing. Distributed dynamic state estimation algorithms and applications in power systems [D]. Jinan:Shandong University,2017.

- [15] ZUO Shan, DAVOUDI A, SONG Y, et al. Distributed finite-time voltage and frequency restoration in islanded AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(10):5988-5997.

作者简介:



马 建

马 建(1967—),男,河南濮阳人,高级工程师,从事电能计量、电能质量方面的研究工作(**E-mail**:jian67@sina.com);

窦晓波(1979—),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为分布式电源高渗透配电网(**E-mail**:dxb_2001@sina.com)。

Design of network information observer based on Kalman filtering algorithm

MA Jian¹, DOU Xiaobo², CHEN Kexu¹, JIAO Yang², GE Pudong²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The traditional power system mostly adopts unified control and management, and has a strong dependence on measurement equipment and communication facilities. Once communication delay, packet loss and other failures occur, the system status monitoring and system control will be affected. Therefore, a non-communication network information observer based on Kalman filtering algorithm for distributed generation connected power system is proposed, which can realize the observation of system node voltage and distributed generation local information without communication information. The effectiveness of the proposed observer is verified by the results of simulation analysis.

Key words: electric power systems; communication; monitoring; Kalman filtering; information measurement; network information observer

(上接第 207 页 continued from page 207)

Estimation method of industry composition of substation loads

SHI Jiajun¹, QIN Chuan¹, JU Ping¹, XU Chunlei², ZHAO Jingbo³, CHEN Yanxiang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to solve the time variation problem of load model and improve the operation security and economy of power grid, an estimation method of industry composition of substation loads is proposed based on the daily load data of bottom load feeders and special line users acquired by energy management system. The data of an actual power grid is taken as an example. Firstly, the factor analysis method is used to reduce the dimension of high-dimension daily sampling data. Then, K-means clustering is carried out according to the dimension reduction results, and the load characteristics are analyzed based on the clustering results to obtain the daily load curves of typical industries. Finally, according to the categories and powers of all the bottom load feeders and special line users, the industry composition of 220 kV substation loads is obtained by bottom-up aggregation. The comparison results with the user data from AMI (Advanced Metering Infrastructure) show that the industry composition of upper substation loads estimated by the proposed method is correspond to the actual situation.

Key words: factor analysis; K-means clustering; industry composition of loads; time variation; load modeling