

卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用综述

李江, 王义伟, 魏超, 张鹏

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 现代电力系统中, 由于可再生能源输出功率、负荷变化以及其他随机过程的存在, 使得系统状态参数中往往混杂着噪声, 因此有必要采取适当的方法, 从随机干扰的观测信号中提取有效的系统状态参数。首先对卡尔曼滤波基本理论进行了介绍, 给出了卡尔曼滤波的基本过程。然后主要综述卡尔曼滤波及其扩展形式在电力系统短期负荷预测、动态状态估计、电能质量分析、继电保护、风电场风速预测、电机状态和参数估计等方面的应用。最后给出了卡尔曼滤波在电力系统中应用的相关结论及其未来发展趋势。

关键词: 卡尔曼滤波; 扩展卡尔曼滤波; 无迹卡尔曼滤波; 电力系统; 风电场

A survey on the application of Kalman filtering method in power system

LI Jiang, WANG Yi-wei, WEI Chao, ZHANG Peng

(School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: In the modern power system, its state parameters are often mixed with noise since the existing of output power of renewable energy, load changing and other stochastic processes. Therefore, taking the appropriate method is needed to extract the valid system state parameters from observed signal involving stochastic disturbance. An outline of Kalman filtering method is described and the basic process of Kalman filter is given; then Kalman filter and its extended form on the application of short-term load forecasting, dynamic state estimation, power quality analysis, relay protection, wind speed forecasting, motor state and parameters estimation are surveyed; finally, the relevant conclusions of Kalman filter in the application of power system are pointed out and its development trend is proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307018).

Key words: Kalman filter; extended Kalman filter; unscented Kalman filter; power system; wind farm

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0135-10

0 引言

大规模电力电子设备和其他非线性元件在电力系统中的应用, 使得各类信号引入了噪声和谐波干扰, 从而给系统正常运行带来了不利影响。实际电力系统中, 由于可再生能源输出功率、负荷变化以及其他随机过程的存在, 常常不能直接获得系统的状态参数, 需要从夹杂着随机干扰的观测信号中分离出系统的状态参数。常规的分方法有快速傅里叶变换^[1-6]、最小均方误差法^[7]、最小二乘法^[8]、自适应陷波滤波器法^[9]等。

1960年, 美籍科学家卡尔曼(R. E. Kalman)在系统状态空间模型的基础上提出了著名的线性卡尔曼滤波器^[10], 它在线性的前提假设下是一个线性无偏、最小方差估计器, 从而可以为线性滤波问题提供精确解析解。然而电力系统是一个高度非线性系统, 由此发展出了多种处理非线性滤波问题的方法, 其中具有代表性的有扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)、Unscented 卡尔曼滤波器(Unscented Kalman Filter, UKF)、中心差分卡尔曼滤波器(Central Difference Kalman Filter)、粒子滤波器(Particle Filter)等^[11]。

随着卡尔曼滤波理论的不断发展和完善, 其在电力系统中的应用也日益凸现, 主要体现在: 电力系统短期负荷预测、动态状态估计、电能质量分析、继电保护、风电场风速预测、电机状态和参数估计

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307018); 吉林省科技发展计划青年基金(201201108); 国家留学基金委资助(201207790009); 东北电力大学优秀青年骨干教师资助项目

等方面。本文将对卡尔曼滤波理论在电力系统中的应用进行系统性的综述。

1 卡尔曼滤波基本理论

基于线性离散系统的卡尔曼滤波优点在于算法可以由计算机执行且不必存储大量数据。下面以线性系统为例介绍其基本理论。

1.1 随机线性连续系统数学模型及其离散化

考虑如下所示的线性连续系统

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{w}(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \quad (2)$$

式中： $\mathbf{x}(t)$ 是系统 n 维状态向量； $\mathbf{w}(t)$ 是 p 维零均值白噪声向量； $\mathbf{A}(t)$ 是 $n \times n$ 维系统矩阵； $\mathbf{B}(t)$ 是 $n \times p$ 维干扰输入矩阵； $\mathbf{z}(t)$ 是 m 维量测向量； $\mathbf{H}(t)$ 是 $m \times n$ 维量测矩阵； $\mathbf{w}(t)$ 和 $\mathbf{v}(t)$ 是互不相关或相关的高斯白噪声，于是可得到随机线性连续系统离散化表达式

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \Phi_{k+1|k} \mathbf{x}_k + \Gamma_{k+1|k} \mathbf{w}_k \\ \mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1} \end{cases} \quad (3)$$

其中满足条件以及离散化过程见文献[11]。

1.2 线性离散系统卡尔曼滤波基本方程

设随机线性离散系统的方程为

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k|k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k|k-1} \mathbf{w}_{k-1} \quad (4)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (5)$$

式中： \mathbf{x}_k 是系统的 n 维状态向量； \mathbf{z}_k 是系统 m 维量测向量； \mathbf{w}_k 是 p 维系统过程噪声； \mathbf{v}_k 是 m 维量测噪声； $\Phi_{k|k-1}$ 是系统 $n \times n$ 维状态转移矩阵； $\Gamma_{k|k-1}$ 是 $n \times p$ 维噪声输入矩阵； \mathbf{H}_k 为 $m \times n$ 维量测矩阵，下标 k 表示第 k 时刻。

如果被估计状态 \mathbf{x}_k 和量测值 \mathbf{z}_k 满足式(4)、式(5)的约束，系统过程噪声 \mathbf{w}_k 和量测噪声 \mathbf{v}_k 满足相应的统计特性假设，则 \mathbf{x}_k 的状态估计 $\hat{\mathbf{x}}_k$ 可按照文献[11]中的方法步骤进行求解。

可以看出，卡尔曼滤波具有两个互相影响的计算回路：状态更新回路和量测更新回路，也就是预测与校正的过程。

2 在电力系统短期负荷预测中的应用

负荷预测是电力系统正常运行和控制的重要环节，将卡尔曼滤波用于短期负荷预测可以有效提高其预测精度。文献[12]对用卡尔曼滤波和自相关

进行负荷预测进行了有关探讨，给出了用卡尔曼滤波进行有效负荷预测的思路，奠定了其理论基础。文献[13]运用卡尔曼滤波理论建立了短期负荷预测模型，通过对卡尔曼滤波算法的改进，提高了短期负荷预测的精度。文献[14]提出利用最小二乘法线性拟合建立负荷数据基本模型，用3次样条插值对卡尔曼滤波器的系统参数进行辨识，最终用卡尔曼滤波器对历史数据进行预处理，纠正了由于测量或人为造成的误差。文献[15]在考虑负荷自身变化特点的基础上，建立了含有时变系数的负荷系统模型、观测模型和系统参数模型，采用两段自适应卡尔曼滤波方法，考虑噪声协方差对预测精度的影响，运用时变噪声统计估值器对噪声协方差进行自适应估计，采用预测方程预测次日的负荷并取得了很好的结果。

公众气象预报是影响电力系统负荷的重要信息，它的偏差可能导致电力负荷预测中出现不可预计的误差。因此，基于随机事件的分布理论，文献[16]给出了卡尔曼滤波器的叠代算法，并运用卡尔曼滤波技术开发气象信息估计器，为电力负荷预测提供具备统计方差最小意义的待测日气象数据，提高了负荷短期预测的准确度。针对天气敏感性负荷，文献[17]建立了负荷的模糊线性模型，使用卡尔曼滤波并结合模糊推理完成了参数估计，明显提高了负荷预测的精度。考虑日常负荷变化的规律，文献[18]给出了基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测的详细流程。

关于超短期负荷预测，文献[19]在考虑多节点有功和无功负荷变化规律的基础上，采用最小二乘支持向量机(RLS-SVM)技术和卡尔曼滤波技术分别对节点有功分配因子和节点功率因数建立自适应动态预测模型，结果表明两种算法满足了系统运算速度、鲁棒性和预测能力的要求。

3 在电力系统动态状态估计中的应用

能量管理系统(EMS)实现对电力系统的运行监视、预测、安全评估及调度控制等功能，而状态估计是其重要组成部分。动态状态估计由于更接近电力系统真实运行状态而备受学术界关注。目前在系统状态估计中使用较多的是扩展卡尔曼滤波器(EKF)和无迹卡尔曼滤波器(UKF)等。

上世纪70年代，Debs基于扩展卡尔曼滤波原理，提出了一种采取最简单系统模型的动态状态估计理论^[20]。Masiello等^[21]也给出了跟踪状态估计器的思想和方法。文献[22]在相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)实测的发电机输出电磁功

率对发电机转子运动方程和外部网络解耦的基础上,提出了基于线性卡尔曼滤波方法的发电机状态变量动态估计模型,并对WAMS的量测误差以及模型动态噪声进行了详细的分析。文献[23]给出了计入非线性Kalman滤波方法(INEKF)。

基于扩展卡尔曼滤波原理,文献[24]在状态转移方程中引入了节点状态综合预测模型,并利用自适应的智能滤波方法对系统的状态进行估计。文献[25]建立了动态状态估计的数学模型,给出了三类改进算法^[23,26]:计入非线性的Kalman滤波法INEKF(Incorporating nonlinearities of measurement function)、自适应预报动态状态估计AFEKF(adaptive forecasting method)和光滑增平面模糊控制动态状态估计SSEFCEKF(Sliding surface-enhanced fuzzy control),从而提高了EKF算法的自适应性、鲁棒性和准确性。

EKF采用的是对非线性函数进行线性化近似的方法,如果系统呈现出强非线性特性,那么其估计精度会严重下降甚至发散。因此,Julier等人^[27-28]根据确定性采样的基本思路,基于Unscented变换(UT)提出了无迹卡尔曼滤波(UKF)。与此同时,Norgaard^[29]和Ito^[30]基于Stirling多项式插值公式分别提出了分开差分滤波和中心差分滤波。后来Merwe^[31]统一将它们称为中心差分卡尔曼滤波器(CDKF),又可称为Sigma点卡尔曼滤波。文献[32]把UKF方法及其平方根形式(Square root UKF, SRUKF)应用到电力系统动态状态估计中,建立了动态状态估计的数学模型,为其改良算法的探索提供了新思路。文献[33]将以无迹变换为基础的UKF法引入电力系统动态状态估计,避免了EKF法线性化所带来的误差,省去了雅可比矩阵的计算,具有很好的收敛性以及高于EKF法的估计精度和稳定性。

为了弥补EKF和UKF各自的缺陷,文献[34]提出了混合卡尔曼粒子滤波器(Mixed Kalman Particle Filter, MKPF),此算法采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)和无迹卡尔曼滤波器(UKF)混合作为建议分布,从而得到了一种更为接近真实分布的近似表达式。验证结果表明电力系统在受到扰动之后, MKPF可以很好地收敛于真实值,和EKF和UKF相比具有更高的精度和稳定性。可以看出,混合卡尔曼粒子滤波器在电力系统动态状态估计中具有很好的应用前景。

4 在电能质量分析中的作用

电能质量包括电压质量、频率质量和波形质量三个方面。随着现代电力系统的发展,敏感性设备

和负荷所带来的电能质量问题引起了广泛的关注^[35-36]。用于电能质量检测的方法有很多,其中包括傅里叶变换方法^[37-40]、最小绝对值(Least absolute value)状态估计^[41]、遗传算法^[42-43]、小波分析^[44-45]、Teager 能量算子(Teager energy operator, TEO)^[46]方法等。鉴于上述方法各自的局限性,卡尔曼滤波凭借自身的优越性在电能质量分析中脱颖而出。文献[47]对常规卡尔曼滤波、扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波三种卡尔曼滤波的基本原理进行了综述,并概括了其在电能质量分析中的应用现状。

对于电压凹陷问题,文献[48]使用二阶卡尔曼滤波去检测电压凹陷,其响应速度较快,而且不受三相不平衡的影响,然而当电压含有谐波时,其精度往往不尽人意。文献[49]提出了基于线性卡尔曼滤波误差序列的暂态电能质量时域检测方法,能够实时确定扰动发生的时刻,并且可以有效获得电压跌落和上升的幅度信息,提高了检测的精度,但是其动态响应速度较慢。因此,文献[50]提出了带补偿分量的时变卡尔曼滤波(time-varying Kalman filter with compensation component, VKF)检测电压凹陷。首先建立带补偿分量的卡尔曼滤波模型,然后采用残差法检测电压突变,控制模型转换,实现了时变卡尔曼滤波。仿真实验表明,该方法具有较快的响应速度,可以满足动态电压恢复器的实时性要求。文献[51]给出的一种基于卡尔曼滤波电压扰动检测算法采用了新的模型来求取电网电压信号的有效值,通过设定电压阈值可以实现电压凹陷或电压凸起波形的实时跟踪,便于实时检测电网的扰动情况。除此之外,卡尔曼滤波还可以对电压闪变和暂降进行有效地监控和预测^[52-55]。

卡尔曼滤波尤其是扩展卡尔曼滤波和无迹卡尔曼滤波在频率跟踪领域得到了广泛的应用^[56-59]。文献[60]引入鲁棒扩展卡尔曼滤波算法,实现了对基波频率的精确跟踪。由于此算法响应速度快,测量精度高,并且能够有效抑制电网噪声对频率跟踪结果的影响,因此可以满足电力系统实时应用的要求。在文献[58]提出的复数型扩展卡尔曼滤波(ECKF)算法的基础上,文献[61]采用一种新颖的基于无迹变换的复数型Sigma点卡尔曼滤波(CSPKF)算法对电力系统的瞬时频率进行动态跟踪。此算法具有2阶的泰勒逼近精度,从而使收敛速度得到了大幅度提高。

关于电力系统谐波问题,上世纪90年代就有人提出卡尔曼滤波在谐波测量中的应用^[62]。文献[63-64]提出使用鲁棒扩展卡尔曼滤波(Robust extended Kalman filtering, REKF)技术来进行动态谐波状态估计,文献[64]把人工神经网络和改进的

EKF结合,并使用REKF进行动态谐波状态估计。文献[65]提出了一种PEKF(the Proposed variant of the extended Kalman filtering)方法去测量电力系统谐波,其具有更好的性能和效率。文献[66]提出了一种基于卡尔曼算法的三相动态谐波状态估计技术,通过对谐波电流的分解并采取适当的状态变量,有效判断出了含谐波源的支路。文献[67]采用自适应卡尔曼滤波算法进行谐波状态估计,选择零矩阵和单位矩阵作为两个假定基本矩阵,自适应卡尔曼滤波器可以在两种基本的Q阵模型之间进行转换,从而避免了卡尔曼滤波在稳定状态切换到暂态情况不能快速地跟踪系统变化的分歧问题。

5 在电力系统继电保护中的应用

继电保护是电力系统安全、可靠、稳定、经济运行的重要保证,因此提高其可靠性对整个系统而言具有重要意义。卡尔曼滤波在继电保护中的应用主要体现在传感器故障的检测和诊断,以及故障信号处理等方面。

文献[68]在卡尔曼滤波技术和假设检验理论的基础上,提出了一种故障检测的方法,验算结果表明此方法可靠快速,灵敏性高。文献[69]从故障检测、故障后电流和电压的估计(滤波)、故障分类、区域计算和故障定位五个部分介绍了卡尔曼滤波算法在微机距离保护中的实施方法。为了改善微机保护中基波分量的计算精度和响应速度,文献[70]对卡尔曼滤波和全周傅氏算法进行了分析比较,结果验证了卡尔曼滤波的优越性。文献[71]将基于联邦卡尔曼滤波器的故障检测与诊断系统和智能容错控制器相结合,有效检测了微机保护传感器部分的故障,提高了微机保护系统的可靠性。系统发生故障时,信号中往往包含大量的非周期分量与谐波分量,从而延迟了卡尔曼滤波的收敛速度。因此,文献[72]结合卡尔曼滤波和小波变换,提出了一种用于故障检测及提取基波分量的方法,即用卡尔曼滤波模型估计基波分量特征并结合sym4小波变换高频分量模极大值追踪故障发生的时刻,在故障发生时刻更新增益系数和误差协方差矩阵,从而减少了卡尔曼滤波模型的响应时间,保证了微机保护对故障的快速响应。

综上所述,卡尔曼滤波具有响应速度快、滤波效果好的特点,能够满足继电保护快速跳闸和准确动作的要求,从而在电力系统继电保护中呈现出了很好的应用前景。

6 在风电场风速预测中的应用

风速预测对风电场和电力系统的运行具有重

要意义。风电场输出功率的波动性主要由风速变化所引起,因此进行精确的风速预测,可以有效避免或减轻风电场对电力系统的不利影响^[73]。风电场风速预测方法较多,比较常用的有人工神经网络^[74-75]、时间序列法^[73,76-77]和卡尔曼滤波法^[78-82]等。考虑到精度的要求,把几种方法相结合进行风速预测成为了趋势。

文献[78]使用最小二乘支持向量机和卡尔曼滤波技术对风电总量和风电分配因子进行了自适应动态预测,并基于关联规律间接地实现了风电场输出功率的超短期预测,结果表明所提出的预测方法具有一定的精度。文献[79]基于时间序列法和卡尔曼滤波法,提出了两种风速短期预测的改进算法,验证结果表明两种算法均可以有效提高风电场实测风速序列短期预测的精度。文献[80]提出了一种基于卡尔曼滤波修正的风电场短期功率预测模型,并使用卡尔曼滤波算法对数值天气预报输出的风速数据进行动态修正,对比分析表明:通过卡尔曼滤波修正的风速数据能够很好地跟踪实际风速数据的变化趋势,预测精度得到了明显提高。

为了弥补各方法存在的缺陷,文献[81]提出了一种时间序列分析和卡尔曼滤波相结合的混合算法,利用时间序列建立了一个能反映序列信号变化规律的低阶模型,并直接推导出了卡尔曼滤波的状态和测量方程,利用卡尔曼预测迭代方程实现了信号的预测,从而解决了建立高阶时间序列模型和推导卡尔曼状态和测量方程困难的问题。文献[82]在贝叶斯-克里金-卡尔曼模型的基础上,给出了多风电场风速滚动优化和预测算法,并在两个公开的多风场风速数据集上验证了模型的有效性,从而有助于电力部门综合利用多区域多风电场的风速数据进行精确的预测。

7 在电机状态和参数估计中的应用

电机作为进行电能的传递或机电能量转换的主要设备,在电力系统中发挥着不可替代的作用。因此对其状态及参数进行有效辨识和估计显得至关重要。文献[83]从扩展卡尔曼滤波算法原理入手,利用定子侧可测量的电流、电压,推导出了异步电动机的转速、磁链状态观测模型,从而估算出了电机的转速和定子磁链,这种方法能够实现电机高性能的控制。

近些年来,卡尔曼滤波在同步电机尤其是永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)中发挥了极致作用。文献[84-85]把扩展卡尔曼滤波(EKF)应用到了永磁同步电机无传感器的控

制中,取得了很好的效果。文献[86]使用卡尔曼滤波观测器对PMSM直接转矩控制(Direct torque control, DTC)系统进行了精确的参数估计。在检测定子电压和电流的基础上,应用EKF观测器准确地估计了电机的定子磁链、电机转速和转子位置,并间接地估计了转矩,实现了PMSM的无速度传感器控制。文献[87]利用扩展卡尔曼滤波理论和滑模构造了永磁同步电动机的转速观测器,可以精确地观测出全速工况时的转速和位置。文献[88]则把扩展卡尔曼滤波的实时性和小波变换的多尺度性进行了结合,基于电机端电压和定子电流的信息对其永磁体的磁场情况进行了在线估计,此算法的诊断精度要优于扩展卡尔曼算法。文献[89]通过一种状态增广的扩展卡尔曼滤波(state augmented extended Kalman filter, AEKF)方法对电机速度、磁极位置和电阻值进行了估计,给系统无位置传感器控制提供了良好的动态响应特性。文献[90]将无迹卡尔曼滤波(UKF)应用于直线电机无位置传感器驱动系统的非线性状态估计中,从而有效避免了扩展卡尔曼滤波(EKF)产生的线性化误差,而且不需要计算雅可比矩阵。

8 结语

虽然卡尔曼滤波理论的提出已经历了半个世纪,但是其凭借自身优势在电力系统中得到了广泛应用。除了以上涉及到的领域外,其还在介质测量^[91]和其他领域^[92-94]发挥了重要作用。本文结合卡尔曼滤波及其扩展形式的特点,综述了其在电力系统各个方面和领域的应用。必须指出的是,卡尔曼滤波也存在着缺陷和不足,其与小波变换以及其他智能算法的结合成为了未来的发展趋势。

参考文献

- [1] 张同尊, 邵俊松, 方勇杰. 一种基于离散傅里叶变换的频率测量算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 70-72.
ZHANG Tong-zun, SHAO Jun-song, FANG Yong-jie. An algorithm for frequency measurement based on DFT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 70-72.
- [2] 温和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164-169.
WEN He, TENG Zhao-sheng, QING Bai-yuan. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [3] 张闯, 刘素贞, 杨庆新, 等. 基于 FFT 和小波包变换的电磁声发射信号处理[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 24-28.
LIU Chuang, LIU Su-zhen, YANG Qing-xin, et al. Signal processing of electromagnetically induced acoustic emission based on FFT and wavelet packet transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 24-28.
- [4] 惠锦, 杨洪耕. 基于间谐波泄漏估算的谐波间谐波分离检测法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 183-190.
HUI Jin, YANG Hong-geng. Harmonics and interharmonics separate-detection method based on estimation of leakage values caused by interharmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 183-190.
- [5] 徐岩, 张晓明, 王瑜, 等. 基于离散傅里叶变换的频谱分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 38-43.
XU Yan, ZHANG Xiao-ming, WANG Yu, et al. A new method of spectrum analysis based on DFT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 38-43.
- [6] 覃思师, 刘前进. 基于粒子群与神经网络的间谐波测量算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 38-43.
QIN Si-shi, LIU Qian-jin. Hybrid algorithm for interharmonics measurement based on particle swarm optimization and neural network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 38-43.
- [7] 李惠宇, 于盛林, 季侃, 等. 电力信号自适应滤波测量的收敛性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(22): 73-76.
LI Hui-yu, YU Sheng-lin, JI Kan, et al. Study on convergence of adaptive filtering measurement for power signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(22): 73-76.
- [8] 李碧君, 薛禹胜, 顾锦汶, 等. 基于权函数的电力系统状态估计算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(8): 32-34.
LI Bi-jun, XUE Yu-sheng, GU Jin-wen, et al. Weight function based power system state estimation algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(8): 32-34.
- [9] 吴斌, 赵学增, 滕志军. 基于自适应陷波器的工频电力通信信号检测[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 35-39.
WU Bin, ZHAO Xue-zeng, TENG Zhi-jun. Detection of

- power frequency communication signal based on adaptive filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 35-39.
- [10] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, 1960, 82(Series D): 35-45.
- [11] 赵琳. 非线性系统滤波理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 1-8.
ZHAO Lin. Nonlinear system filtering theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 1-8.
- [12] HUELSEMANN S M. Short and ultra-short term load forecast by Kalman filter and autocorrelation[C] // Proceedings of the Universities Power Engineering Conference. Edinburgh (UK): 1998: 497-500.
- [13] 李明干, 孙健利, 刘沛. 基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测[J]. 继电器, 2004, 32(4): 9-12.
LI Ming-gan, SUN Jian-li, LIU Pei. Short-term load forecast of power system based on Kalman filter[J]. Relay, 2004, 32(4): 9-12.
- [14] 张民, 鲍海, 晏玲, 等. 基于卡尔曼滤波的短期负荷预测方法的研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 39-42.
ZHANG Min, BAO Hai, YAN Ling, et al. Research on processing of short-term historical data of daily load based on Kalman filter[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 39-42.
- [15] 马静波, 杨洪耕. 自适应卡尔曼滤波在电力系统短期负荷预测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 75-79.
MA Jing-bo, YANG Hong-geng. Application of adaptive Kalman filter in power system short-term load forecasting[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 75-79.
- [16] 李鹏, 任震, 张勇军. 运用卡尔曼滤波技术开发气象估计器的研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 36-39.
LI Peng, REN Zhen, ZHANG Yong-jun. Kalman filter based weather estimator designing[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 30(6): 36-39.
- [17] AL-HAMADI H M, SOLIMAN S A. Fuzzy short-term electric load forecasting using Kalman filter[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 2006, 153(2): 217-227.
- [18] GASALDI M, LAMEDICA R, NARDECCHIA A, et al. Short-term forecasting of municipal load through a Kalman filtering based approach[C] // Power Systems Conference and Exposition, 2004: 1453-1458.
- [19] 韩力, 韩学山, 负志皓, 等. 多节点超短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 30-33.
HAN Li, HAN Xue-shan, YUN Zhi-hao, et al. Method for ultra-short term multi-node load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 30-33.
- [20] DEBS A S, LARSON R E. A dynamic estimator for tracking the state of a power system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 89(7): 1670-1678.
- [21] SCHWEPPE F C, MASIELLO R D. A tracking static state estimator [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1971, 90(3): 1025-1033.
- [22] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于 WAMS 的电力系统机电暂态过程动态状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 19-24.
QIN Xiao-hui, BI Tian-shu, YANG Qi-xun. Dynamic state estimator based on WAMS during power system transient process[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 19-24.
- [23] MANDAL J K, SINHA A K, et al. Incorporating nonlinearities of measurement function in power system dynamic state estimation[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(3): 289-296.
- [24] 韩力, 韩学山, 陈芳. 基于综合预测和自适应滤波器的电力系统动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 107-112.
HAN Li, HAN Xue-shan, CHEN Fang. Dynamic state estimation in power system based on integrated forecasting model and adaptive filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 107-112.
- [25] 刘辉乐, 刘天琪. 电力系统动态状态估计的研究现状和展望[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 73-76.
LIU Hui-le, LIU Tian-qi. Status quo and prospect of power system dynamic state estimation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 73-76.
- [26] LIN J M, HUANG S J. Application of sliding surface-enhanced fuzzy control for dynamic state estimation of a power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 570-577.
- [27] JULIER S J, UHLMANN J K. A new approach for filtering nonlinear system[C] // Proc of the 1995 American Control Conference, 1995: 1628-1632.
- [28] JULIER S J, UHLMANN J K. A new method for the

- nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [29] NORGAARD M, POULSEN N K. New developments in state estimation for nonlinear systems[J]. Automatica, 2000, 36(11): 1627-1638.
- [30] ITO K, XIONG K. Gaussian filters for nonlinear filtering problems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(5): 910-927.
- [31] MERWE R V. Sigma-point Kalman filters for probabilistic inference in dynamic state-space models[EB/OL]. [2004]. <http://www.cslu.ogi.edu/publications/>.
- [32] 卫志农, 孙国强, 庞博. 无迹卡尔曼滤波及其平方根形式在电力系统动态状态估计中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 74-78.
WEI Zhi-nong, SUN Guo-qiang, PANG Bo. Application of UKF and SRUKF to power system dynamic state estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 74-78.
- [33] 李大路, 李蕊, 孙元章. 混合量测下基于 UKF 的电力系统动态状态估计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 17-21.
LI Da-lu, LI Rui, SUN Yuan-zhang. Power system dynamic state estimation with mixed measurements based on UKF[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 17-21.
- [34] 陈焕远, 刘新东, 余彩绮. 电力系统动态状态估计算法研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 25(11): 6071-6074.
CHEN Huan-yuan, LIU Xin-dong, SHE Cai-qi. Study on power system dynamic state estimation algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 25(11): 6071-6074.
- [35] DUGAN R C, MEGRANGHAN M F, BENTY H W. Electrical power system quality[M]. New York: MC Graw-Hill, 1996: 1.
- [36] SANNINO A, SVENSSON J, LARSSON T. Power-electronic solutions to power quality problems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 71-82.
- [37] SRINIVASAN K. Digital measurement of voltage flicker[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1593-1598.
- [38] 李庚银, 陈志业, 宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 37-40.
LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, NING Yu. Two improved algorithms of the fast Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 37-40.
- [39] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [40] 薛蕙, 杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Precise algorithms for harmonic analysis based on FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 106-110.
- [41] SOLIMAN S, EI-HAWARY M. Measurement of power system voltage and flicker levels for power quality analysis: a static LAV state estimation based algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2000, 22(6): 447-450.
- [42] EL-NAGGAR K M, AL-HASAWI W M. A genetic based algorithm for measurement of power system disturbances [J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(9-10): 808-814.
- [43] EL-ZONKOLY A M. Power system model validation for power quality assessment applications using genetic algorithm[J]. Expert Systems with Applications, 2005, 29(4): 941-944.
- [44] SANTOSO S, POWERS E J, GRADY W M. Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis[C] // Proceedings of the IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, Philadelphia, USA.
- [45] HUANG S J, HSIEH C T, HUANG C L. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(1): 235-241.
- [46] ABDEL-GALIL T K, EL-SAADANY E F, SALAMA M M A. Online tracking of voltage flicker utilizing energy operator and Hilbert transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 861-867.
- [47] 于静文, 董蕙, 温渤婴. 基于卡尔曼滤波的电能质量分析方法综述[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 97-102.
YU Jing-wen, XUE Hui, WEN Bo-ying. A survey on Kalman filtering based methods for power quality

- analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 97-102.
- [48] ELNADY A, SALAMA M M A. Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 992-1000.
- [49] 张静, 徐政. 基于卡尔曼滤波误差的电能质量扰动检测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 25-30.
ZHANG Jing, XU Zheng. Power quality disturbances detection based on Kalman filter residuals[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 25-30.
- [50] 袁锋, 杨洪耕, 林呈辉. 带补偿分量的时变卡尔曼滤波器的电压凹陷检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 81-86.
YUAN Feng, YANG Hong-geng, LIN Cheng-hui. A method for voltage sag detection based on time-varying Kalman filter with compensation component[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 81-86.
- [51] 任文琳, 赵庆生, 何志方. 基于卡尔曼滤波器的电压扰动检测算法[J]. 水电能源科学, 2012, 30(11): 198-200.
REN Wen-lin, ZHAO Qing-sheng, HE Zhi-fang. Detection of voltage disturbance based on Kalman filter algorithm[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(11): 198-200.
- [52] KAMWA I, SRINIVASAN K. Kalman filter-based technique for combined digital estimation of voltage flicker and phasor in power distribution systems[J]. European Transactions on Electrical Power Engineering, 1993, 3(2): 131-142.
- [53] GIRGIS A A, MAKRAM E B. Measurement of voltage flicker magnitude and frequency using a Kalman filtering based approach[C] // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Calgary, Canada, 1996.
- [54] PEREZ E, BARROS J. An extended Kalman filtering approach for detection and analysis of voltage dips in power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 78(4): 618-625.
- [55] BARROS J, PEREZ E. A combined wavelet-Kalman filtering scheme for automatic detection and analysis of voltage dips in power systems[C] // 2005 IEEE Russia Power Tech, Petersburg, Russia, 2005.
- [56] DASH P K, PRADHAN A K, PANDA G. Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 761-766.
- [57] AUROBINDA R, ASHOK K P, RAO K P. A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power Systems[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 469-479.
- [58] DASH P K, JENA R K, PANDA G, et al. An extended complex kalman filter for frequency measurement of distorted signals[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(4): 746-753.
- [59] HUANG C H, LEE C H, SHIH K J, et al. Frequency estimation of distorted power system signals using a robust algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 41-51.
- [60] 张斌, 张东来. 电力系统自适应基波提取与频率跟踪算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 81-89.
ZHANG Bin, ZHANG Dong-lai. Adaptive fundamental component extraction and frequency tracking algorithm for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 81-89.
- [61] 罗谌持, 张明. 基于 Sigma 点卡尔曼滤波器的电力频率跟踪新算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 35-39.
LUO Chen-chi, ZHANG Ming. Frequency tracking of distorted power signal using complex sigma point Kalman filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 35-39.
- [62] BEIDES H M, HEYDT G T. Dynamic state estimation of power-system harmonics using Kalman filter methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1663-1670.
- [63] KUMAR A, DAS B, SHARMA J. Dynamic state estimation of power system harmonics with bad data[J]. Electric Power Components and Systems, 2005, 33(12): 1281-1295.
- [64] KUMAR A, DAS B, SHARMA J. Robust dynamic state estimation of power system harmonics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2006, 28(1): 65-74.
- [65] ROUSTRAY A, PRADHAN A K, RAO K P. A novel Kalman filter for frequency estimation of distorted signals in power systems[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(3): 469-479.
- [66] MA Hai-li, GIRGIS A A. Identification and tracking of

- harmonic source in a power system using a Kalman filter [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1659-1665.
- [67] YU K K C, WATSON N R, ARRILLAGA J. An adaptive Kalman filter for dynamic harmonic state estimation and harmonic injection tracking[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1577-1584.
- [68] 别朝红, 于葵, 于九祥. 一种故障检测的新方法[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(4): 39-42.
BIAO Zhao-hong, YU Yan, YU Jiu-xiang. A new algorithm of fault detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(4): 39-42.
- [69] 于九祥. 卡尔曼滤波技术在距离保护上的应用[J]. 继电器, 1998, 26(4): 20-24.
YU Jiu-xiang. The application of Kalman filtering technique in distance protection[J]. Relay, 1998, 26(4): 20-24.
- [70] 张举, 董杰. 数字保护中两种算法的比较研究[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(4): 6-10.
ZHANG Ju, DONG Jie. Comparison of two algorithms in digital protection[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(4): 6-10.
- [71] 程宏波, 王勋, 伦利. 微机保护传感器故障的一种容错控制方法[J]. 继电器, 2007, 35(19): 1-4.
CHENG Hong-bo, WANG Xun, LUN Li. Sensors' fault tolerant control of microcomputer-based relay protection [J]. Relay, 2007, 35(19): 1-4.
- [72] 孙旭霞, 郭永胜. 基于小波-卡尔曼滤波的基波分量提取[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 93-98.
SUN Xu-xia, GUO Yong-sheng. Wavelet-based Kalman filter for fundamental component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(4): 93-98.
- [73] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 1-5.
YANG Xiu-yuan, XIAO Yang, CHEN Shu-yong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5.
- [74] LI Shu-hui, WUNSCH D C, O HAIR E A, et al. Using natural networks to estimate wind turbine power generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(3): 276-282.
- [75] 范高锋, 王伟胜, 刘纯, 等. 基于人工神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 118-123.
FAN Gao-feng, WANG Wei-sheng, LIU Chun, et al. Wind power prediction based on artificial neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 118-123.
- [76] BILLINTON R, CHEN H, GHAJAR R. Time-series models for reliability evaluation of power systems including wind energy[J]. Microelectronics and Reliability, 1996, 36(9): 1253-1261.
- [77] 丁明, 张立军, 吴义纯. 基于时间序列分析的风电场风速预测模型[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 32-34.
DING Ming, ZHANG Li-jun, WU Yi-chun. Wind speed forecast model for wind farms based on time series analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 32-34.
- [78] 李智, 韩学山, 韩力, 等. 地区电网风电场功率超短期预测方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 90-94.
LI Zhi, HAN Xue-shan, HAN Li, et al. An ultra-short-term wind power forecasting method in regional grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 90-94.
- [79] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 风电场风速短期多步预测改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(26): 87-91.
PAN Di-fu, LIU Hui, LI Yan-fei. Optimization algorithm of short-term multi-step wind speed forecast[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(26): 87-91.
- [80] 赵攀, 戴义平, 夏俊荣, 等. 卡尔曼滤波修正的风电场短期功率预测模型[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 47-51.
ZHAO Pan, DAI Yi-ping, XIA Jun-rong, et al. A Kalman filter based correction model for short-term wind power prediction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 47-51.
- [81] 潘迪夫, 刘辉, 李燕飞. 基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的风电场风速预测优化模型[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 82-86.
PAN Di-fu, LIU Hui, LI Yan-fei. A wind speed forecasting optimization model for wind farms based on time series analysis and Kalman filter algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 82-86.
- [82] 卿湘运, 杨富文, 王行愚. 采用贝叶斯-克里金-卡尔曼模型的多风电场风速短期预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(35): 107-114.
QING Xiang-yun, YANG Fu-wen, WANG Xing-yu. Short-term wind speed forecasting for multiple wind farms using Bayesian Kriged Kalman mode[J].

- Proceedings of the CSEE, 2012, 32(35): 107-114.
- [83] 徐进, 陈珊杰. EKF 直接转矩控制的感应电机状态观测器[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 127-130.
XU Jin, CHEN Shan-jie. New design of DTC AC motor state observer based on EKF[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5): 127-130.
- [84] BOLOGNANI S, TUBIANA L, ZIGLIOTTO M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [85] COMNAC V, CIRSTE M N, MOLDOVEANU F. Sensorless speed and direct torque control of interior permanent magnet synchronous machine based on extended Kalman filter[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronic, China, 2002: 1142-1147.
- [86] 陈振, 刘向东, 靳永强, 等. 采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 75-81.
CHEN Zhen, LIU Xiang-dong, JIN Yong-qiang, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter observer of flux linkage[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 75-81.
- [87] 李君, 李毓洲. 无速度传感器永磁同步电机的 SVM-DTC 控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 28-34.
LI Jun, LI Yu-zhou. Speed sensorless SVM-DTC for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 28-34.
- [88] 文传博, 齐亮. 永磁同步电机磁链信息在线监测的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 22-26.
WEN Chuan-bo, QI Liang. On-line detection method of magnet flux linkage for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 22-26.
- [89] 陆华才, 徐月同. 基于 AEKF 的永磁直线同步电机速度和位置估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 90-94.
LU Hua-cai, XU Yue-tong. Speed and position estimation algorithm of permanent magnet linear synchronous motor based on augmented extended Kalman filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 90-94.
- [90] 余佩琼, 陆亿红, 王涌, 等. 永磁直线同步电动机无位置传感器控制系统的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 53-57.
YU Pei-qiong, LU Yi-hong, WANG Yong, et al. Research on permanent magnet linear synchronous motor position sensorless control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 53-57.
- [91] 贾嵘, 杨可, 原丽, 等. 基于卡尔曼滤波和加窗插值谐波分析法的介损测量方法[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 52-55.
JIA Rong, YANG Ke, YUAN Li, et al. Dielectric loss measurement based on Kalman filter and interpolating windowed fast Fourier transform algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 52-55.
- [92] 王兴志, 严正, 沈沉, 等. 基于在线核学习的电网不良数据检测与辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 50-55.
WANG Xing-zhi, YAN Zheng, SHEN Chen, et al. Power grid bad-data detection and identification based on online kernel learning method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 50-55.
- [93] 谭平, 蔡自兴. 强噪声背景下的多精度传感器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 83-87.
TAN Ping, CAI Zi-xing. Fault diagnosis of Multi-precision sensors in large noise background[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 83-87.
- [94] 何玉林, 黄帅, 杜静, 等. 基于前馈的风力发电机组变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 15-20.
HE Yu-lin, HUANG Shuai, DU Jing, et al. Variable pitch control of wind turbine based on feed forward[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 15-20.

收稿日期: 2013-06-21; 修回日期: 2013-11-26

作者简介:

李江(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为饱和系统的分析与控制;

王义伟(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定; E-mail:291029540@qq.com

魏超(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网拓扑结构分析。