

基于广域量测技术的输电线路温度监测设计与系统实现

本文介绍了基于PMU数据的线路温度估计算法、监测系统整体功能结构设计及其应用软件的实现，它可作为广域量测系统的独立应用功能模块进行灵活配置。通过对该系统功能的阐述及其实际应用的情况可以看出，该软件系统具有在线运行、离线反演、使用方便、简单实用等优点，其监测计算结果可作为线路实际运行温度的重要参考。

王波¹ 刘栋¹ 陆进军¹ 钱玉妹² 张道农³/1.国电南瑞科技股份有限公司 2.江苏电力调度控制中心 3.华北电力设计院工程有限公司

0 引言



王波/高级工程师

当前研究表明，通过提高输电线路允许的最高运行温度可以有效提升输电线路的输送能力^[1-3]，这就为在资源相对紧张的情况下缓解电网输电压力提供了可行的技术指示：电网运行管理部门可以通过监测输电线路温度的变化情况在线评估线路的热稳定情况，确认线路负荷运行水平，并根据实际情况进一步提升线路输电能力和输送效率。

传统的线路温度监测手段主要有间接测温方法（例如，采用便携式测温设备进行人工现场测量等）和线路温度监测系统（该系统在需要监视的输电网络安装温度测量单元，在监控中心建设独立的温度监测系统实现对输电线路的实时自动监测）两种。而近年来，随着基于广域测量技术的广域监测系统（Wide Area Measurement System, WAMS）^[4-8]的发展，基于WAMS高精度、高密度和严格时钟同步的动态PMU数据的研究与应用为输电线路温度的在线监测又提供了新的技术手段：利用线路两端电压/电流同步相量数据实时辨识线路参数（电

阻、电抗等），再基于线路电阻和其温度之间的物理解析关系间接实现对线路温度的实时估计^[9-10]。

1 线路温度计算方法

1.1 线路温度与电阻的关系

从输电线路电热耦合的物理规律看，输电线路温度变化实质体现为电阻效应。在实际工程应用中，一般输电线路载荷长期的最高允许温度不超过80℃，而在此情况下，导体电阻 R 与温度 T 之间的关系可近似表达为

$$R=R_{20}[1+\alpha(T-20)] \quad (1)$$

式中， R_{20} 指温度为20℃时的电阻值，该值可从有关手册中查得； α 为电阻温度变化系数，它取决于导体材料并且不会随时间而发生变化，对于铜 $\alpha=0.00382$ ，对于铝 $\alpha=0.0036$ 。

因此，利用输电线路电阻与其温度之间的物理关系，可以利用式（1）将对线路温度的估计转换为对电阻参数的估计。

1.2 线路电阻估计方法

对于线路电阻的估计选取线路的PI型等值模型，如图1所示。利用PMU采集的线路两端实时电压/电流相量动态数据，基于最小二乘算法实现线路电阻参数的辨识。

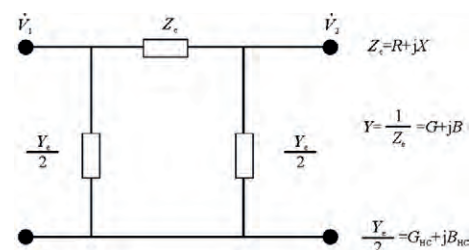


图1 输电线路PI型等值电路

关键词/Keywords

PMU ·
线路温度 ·
监测系统 ·
WAMS ·

对于图1所示的线路等值模型方程,可用如下方程描述

$$\begin{aligned} \dot{F}_1(G, B, G_{HC}, B_{HC}) &= (G + jB)(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ &\quad + (G_{HC} + jB_{HC})\dot{V}_1 - \dot{I}_1 = 0 \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_2(G, B, G_{HC}, B_{HC}) &= (G + jB)(\dot{V}_2 - \dot{V}_1) \\ &\quad + (G_{HC} + jB_{HC})\dot{V}_2 - \dot{I}_2 = 0 \quad (3) \end{aligned}$$

式(2)、式(3)中, $\dot{V}_1$ 、 $\dot{V}_2$ 、 $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 为线路两端的电压与电流相量, $G+jB$ 、 $G_{HC}+jB_{HC}$ 为线路导纳和两端并联导纳。

这里的线路参数估计就是求取使得对于 n 次测量结果的加权最小二乘目标函数最小的一组线路参数 $G+jB$ 、 $G_{HC}+jB_{HC}$ 。

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^n w_1^2 \left| \dot{F}_1(G, B, G_{HC}, B_{HC}) \right|^2 + w_2^2 \left| \dot{F}_2(G, B, G_{HC}, B_{HC}) \right|^2 \right\} \quad (4)$$

将上式中 $\dot{F}_1$ 、 $\dot{F}_2$ 的实部和虚部分开,式(4)可表示为

$$F = \min \left\{ \sum_{i=1}^n w_1^2 (F_{1ir}^2 + F_{1ii}^2) + w_2^2 (F_{2ir}^2 + F_{2ii}^2) \right\} \quad (5)$$

根据函数的极值理论,上述目标函数最小的线路参数应满足如下约束条件

$$\frac{\partial F}{\partial G} = 0, \frac{\partial F}{\partial B} = 0, \frac{\partial F}{\partial G_{HC}} = 0, \frac{\partial F}{\partial B_{HC}} = 0 \quad (6)$$

由式(6)对每一组量测数据进行计算,可用如下矩阵表示

$$\begin{bmatrix} F_{1ir} \\ F_{1ii} \\ F_{2ir} \\ F_{2ii} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (V_{1lr} - V_{2lr}) & -(V_{1li} - V_{2li}) & V_{1lr} - V_{1li} \\ (V_{1li} - V_{2li}) & (V_{1lr} - V_{2lr}) & V_{1li} - V_{1lr} \\ (V_{2lr} - V_{1lr}) & -(V_{2li} - V_{1li}) & V_{2lr} - V_{2li} \\ (V_{2li} - V_{1li}) & (V_{2lr} - V_{1lr}) & V_{2li} - V_{2lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G \\ B \\ G_{HC} \\ B_{HC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{1ir} \\ I_{1ii} \\ I_{2ir} \\ I_{2ii} \end{bmatrix} \quad (7)$$

可将上式简记为

$$F_i = A_i X - I_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

上述方程可求解唯一变量 X ,即为线路参数 $G+jB$ 、 $G_{HC}+jB_{HC}$ 的最小偏差估计值,并可进一步得到线路电阻的估计值。

2 系统软件实现

基于广域测量数据的输电线路温度监测系统按照智能电网调度技术支持系统中电网运行动态监视与分析(WAMS)的独立应用功能模块进行设计,并借助D5000系统平台的统一资源与接口实现。

其系统软件功能实现流程如图2所示,主要包括分析数据获取模块、数据预处理模块、温度估计计算模块、数据存储与检索模块和人机接口模块。

2.1 分析数据获取模块

分析数据获取模块负责获取线路温度监测系统计算所需使用的PMU动态数据。根据监测功能运行模式的不同(在线运行和离线运行),分为实时数据输入模式与离线数据输入模式。

对于在线运行模式,分析数据获取模块从WAMS中专用的PMU实时数据高速缓存区中按照最新时间断面不间断获取待监测线路两端电压、电流相量数据(这些数据都是来自WAMS前置系统经过解析之后的实时报文),进行线路温度实时估计。

对于离线运行模式,线路温度监视所使用的数据来源主要为以下两类。

1) 存储在WAMS主站时间序列历史数据库中的PMU历史动态数据,其数据密度与实时数据密度一致(一般为25帧/s或50帧/s)。

2) 根据分析的需要,由人工手动执行从PMU子站召唤到WAMS主站的离线动态数据文件,其数据密度达到100帧/s。两种离线数据相互补充,以满足不同离线分析的需要。

2.2 数据预处理模块

数据预处理模块主要用于确保后续分析计算数据的正确性与有效性。

其主要负责完成:①对原始数据的滤波处理;②数据的有效性与合理性判断(依据数据质量码、数据合理性范围等);③待分析数据的必要转换;④分析数据的完整性判断(是否缺失数据等);⑤线路设备运行状态判断(停运)等。

在数据预处理过程中,当出现线路相关量测数据质量码异常、数据不合理、不完整或设备停运等非正常情况时,系统功能流程将自动跳过后续计算分析模块,以避免无效量测数据分析可能导致的错误计算结果。

2.3 温度估计算法模块

温度估计算法模块以数据预处理模块筛选出的可用数据为基础,首先采用前面介绍的最小二乘算法来辨识待监测线路的电阻参数,然后利用

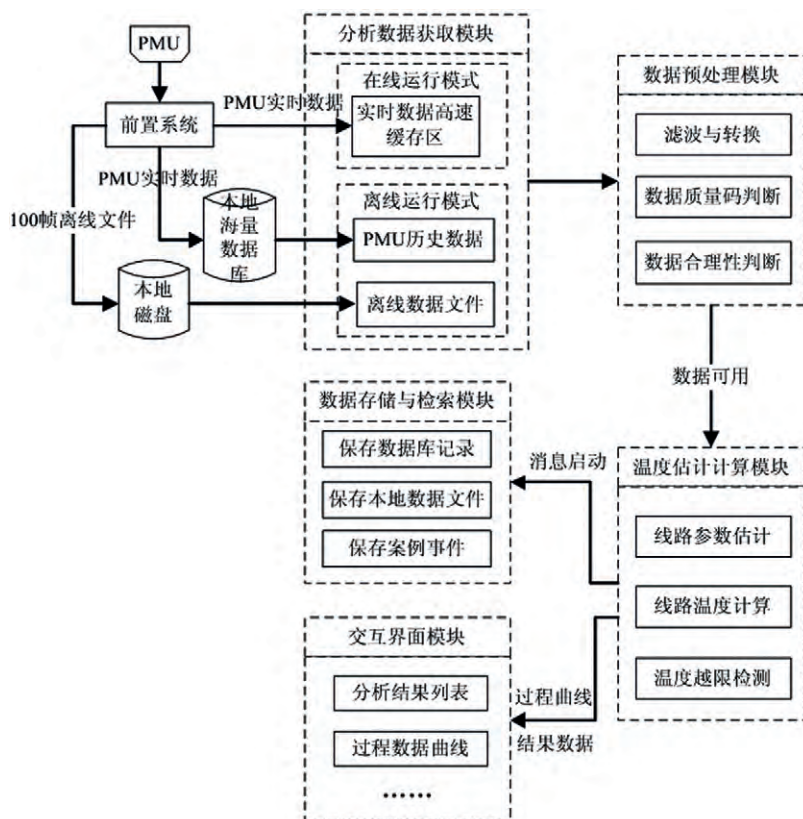


图2 线路温度监测软件系统功能结构

线路电阻与线路温度的实际物理关系估算线路实际运行温度，并将估算的线路温度提供给系统界面进行展示。

此外，该计算模块还实现对线路运行温度的越限检测与告警。结合待监测线路设定的温度运行限值，对于线路温度临近或超过给定限值时，实现对线路运行温度的预警、告警等多种越限检测。

而在离线运行模式下，该计算模块可基于PMU离线数据，由人工触发启动计算，完成指定线路运行温度的离线分析计算与结果统计等功能。

线路温度估计算法流程如图3所示。

2.4 数据存储与检索模块

数据存储与检索模块主要由分析计算模块通过系统消息的方式触发启动。它负责对每次分析计算得到的线路电阻、温度变化情况及线路温度越限事件等进行数据与结果的存储。同时，提供专用的用户浏览界面，方便使用人员检索查询。

该模块数据存储的内容包括：①正常情况下的线路电阻、线路温度的周期采样数据（便于趋

势查看与统计）。②线路运行温度越限情况下的线路温度越限起止时间、线路温度限值、线路温度/电阻最大值、最大越限百分比等信息。

该模块提供的数据存储方式包括：数据库存储方式和文件存储方式。采用不同的数据存储方式相结合来满足案例事件长期存储与管理的需要。

2.5 交互界面模块

由于本输电线路温度监测功能是基于智能电网调度技术支持系统（D5000系统）实现，因此，在人机界面方面充分借助了D5000系统强大的界面支撑功能。利用现有平台的动态图元控件、动态曲线控件、动态表格控件和柱状图控件等，对线路温度监测系统的各项功能（如事后计算分析、案例查询、数据统计及计算参数设置等）与数据结果展示提供了完美的支撑。

结合基于QT定制开发的线路温度分析工具，可以基于PMU实时/历史动态数据计算给出更加详尽直观的分析信息与展示效果，如线路电阻/温度的区间估计（置信度95%）和点估计值、电阻/温

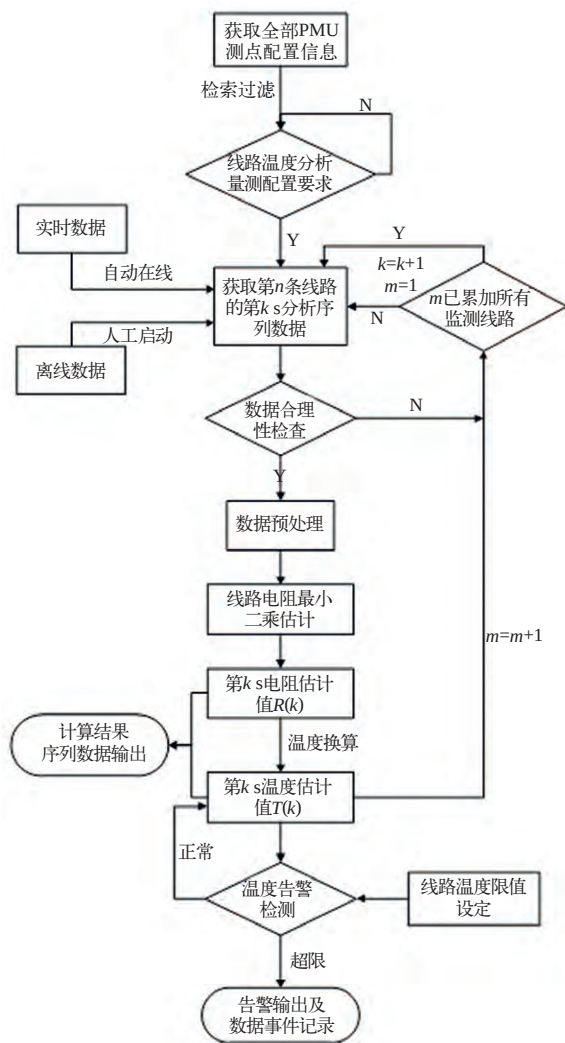


图3 线路温度监测软件分析计算流程图

度估计结果的直方图效果、电阻/温度估计结果的趋势图效果等。

3 实际应用效果

基于某实际电网的WAMS开发实现了本文介绍的线路温度监测软件。

这里选取该实际电网中某500 kV输电线路温度监测效果为例。该线路两端均配置PMU设备并以25 帧/s的数据密度向WAMS主站采集上传线路两端三相电压相量、三相电流相量以及功率等动态数据。该输电线路类型为4×LGJ-630，线路长度112 km，单位长度电阻0.013 Ω/km。

计算中以1 s数据（即25个数据）作为每轮最小二乘计算的量测序列进行线路电阻参数的实时估计，并进一步根据式（1）计算获取线路对应运行温度值。计算数据已通过相/序分量变换转换为

正序分量（鉴于篇幅原因，这里只给出第1 s的前10个数据），如表1所示。

表1 线路两端电压/电流相量

序号	首端电压 /kV	首端电流 /A	末端电压 /kV	末端电流 /A
1	298.478 -26.958 2	846.146 -30.907 7	295.739 -29.212 6	851.420 143.752 0
2	298.451 -27.145 5	846.546 -31.102 1	295.738 -29.401 9	851.414 143.566 8
3	298.540 -27.325 2	846.141 -31.226 7	295.821 -29.585 3	851.416 143.438 7
4	298.546 -27.510 2	846.556 -31.385 1	295.853 -29.768 9	851.423 143.280 3
5	298.587 -27.692 2	846.560 -31.541 9	295.885 -29.955 9	851.020 143.115 3
6	298.554 -27.873 5	846.145 -31.758 1	295.868 -30.143 3	851.012 142.899 0
7	298.542 -28.064 8	846.144 -31.954 7	295.850 -30.334 3	851.420 142.701 0
8	298.463 -28.247 8	846.148 -32.197 7	295.765 -30.525 6	851.421 142.470 1
9	298.478 -28.439 2	845.739 -32.368 5	295.768 -30.708 6	851.014 142.291 3
10	298.443 -28.626 5	845.740 -32.578 8	295.715 -30.895 9	850.607 142.090 1

基于上述实际线路PMU量测数据，利用本文方法计算线路电阻参数与运行温度（导体温度变化系数取为0.003 6），其计算结果如表2所示（只给出前10 s计算结果）。

表2 线路电阻与温度计算值

序号	电阻/Ω	温度/°C
1	1.872 643	59.48
2	1.868 651	58.72
3	1.885 067	61.85
4	1.874 188	59.78
5	1.875 377	60.01
6	1.885 23	61.88
7	1.875 829	60.09
8	1.878 457	60.59
9	1.873 453	59.64
10	1.872 216	59.41

对于上述线路参数计算结果利用本线路温度监测软件功能界面进行跟踪、统计与展示，其效果如图4、图5所示。

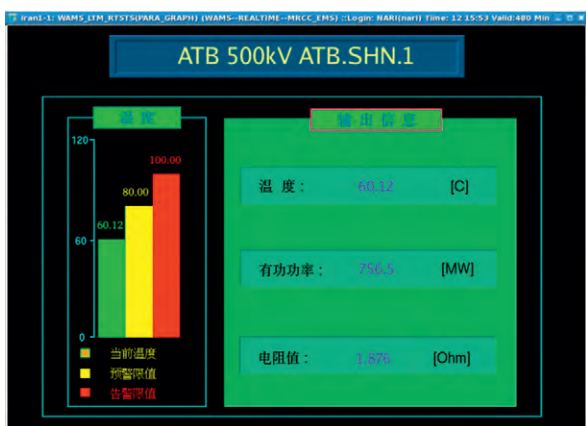


图4 当前线路温度/电阻展示

图4所示为监测线路的当前温度、电阻和功率等数据实时值及温度运行限值，实时反映当前线路温度运行裕度与对应负荷水平。

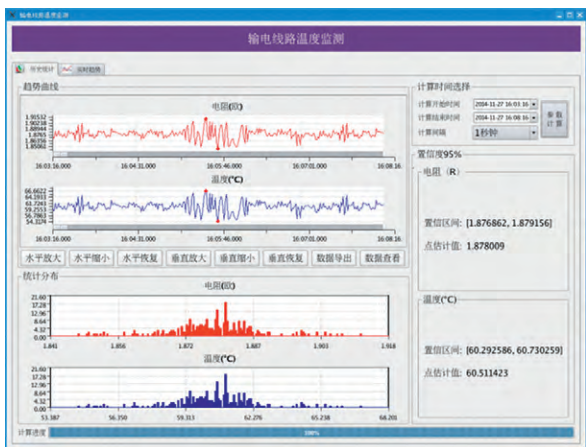


图5 线路温度/电阻变化趋势与统计图

图5所示为监测线路电阻、温度的直方统计分布图和趋势变化曲线图。由图可见该时段线路电阻估计值主要分布在1.878 Ω 附近，线路温度估计值主要分布在60 $^{\circ}\text{C}$ 左右。

同时，图中还按照统计理论对时段内所有计算结果进行了置信度为95%的区间估计与点估计值的计算与展示。此外，功能界面还提供计算结果的数据导出、数据查看等功能，为用户提供便捷的使用。

从实际应用效果可以看出，通过该功能软件能够准确、直观地监视当前线路的温度状态及其变化情况，及时掌握与感知线路温度发展趋势与线路负荷运行水平，帮助运行人员实时动态评定输电线路热稳定情况。

4 结束语

从实际使用效果来看，与传统的线路温度监测手段相比较，该系统软件具有在线监测、离线反演、简单实用、使用方便、投资建设与运维成本低等优点，其线路温度估计结果可为动态评估输电线路热稳定情况提供重要参考，具有一定的社会效益。

参考文献

- [1] 黄新波, 孙钦东, 张冠军, 等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138-1144.
- [2] 叶自强, 朱和平. 提高输电线路输送容量的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 258-263.
- [3] 徐青松, 季洪献, 侯炜. 监测导线温度实现输电线路增容新技术[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 171-176.
- [4] 任先文, 谷延辉, 解东光, 等. 电网广域测量系统中PMU的研究和设计[J]. 继电器, 2005, 33(14): 52-56.
- [5] 许树楷, 谢小荣, 辛耀中. 基于同步相量测量技术的广域测量系统应用现状及发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 44-49.
- [6] 李丹, 韩福坤, 郭子明, 等. 华北电网广域实时动态监测系统[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 52-56.
- [7] 曹路, 汪德星, 岑宗浩. 广域测量系统在华东电网中的应用[J]. 电力设备, 2005, 6(12): 38-41.
- [8] 干磊, 康河文, 何敏. 基于广域测量系统的电压稳定动态监测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 152-155.
- [9] 陆进军, 张力. 基于PMU量测的线路参数辨识算法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(11): 27-31.
- [10] 陈芳, 韩学山, 李华东, 等. 基于相量测量单元的输电线路温度跟踪估计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 25-29.

(收稿日期: 2015-05-15) EA

作者简介

王波 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事广域相量测量系统相关研究与设计开发。

刘栋 (1983-), 男, 本科, 工程师, 主要从事广域相量测量系统相关研究与设计开发。