

DOI: 10.7500/AEPS20130909002

智能电网态势图建模及态势感知可视化的概念设计

章坚民^{1,3}, 陈 昊¹, 陈 建², 周明磊², 庄晓丹², 陈耀军³

(1. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江省杭州市 310018;

2. 国网浙江省电力公司信息通信分公司, 浙江省杭州市 310006;

3. 浙江创维自动化工程有限公司, 浙江省杭州市 310012)

摘要: 提出了智能电网态势管理概念模型及概念设计, 包括态势感知可视化对象建模及应具有的核心算法模块。态势可视化的核心是态势图建模, 文中提出了态势图构成模型, 并提出了实时态势图片生成以及基于条件触发的历史图片存储机制。存储的带时间戳的历史态势图片, 经过拼图, 可实现历史动态态势图动画反演播放; 提出了未来的预测动态态势图的生成机制, 生成的带时戳的未来态势图片, 经过拼图, 可实现未来动态态势图动画播放。初步探讨了态势图设计评价指标, 指出态势底图的选择将直接影响到态势感应和感知可视化效果。

关键词: 智能电网; 态势管理; 概念设计; 态势可视化; 态势图建模; 态势图片; 态势图生成; 态势图播放

0 引言

智能电网是两大人造网络即电网与通信和信息网的高度融合。气象及气候变化的随机性, 自然灾害(如雷电等)的不确定性, 人类用电随机性, 通信系统延时、丢包等信息不确定性, 电力、通信系统设备 & 网络健康状态的不确定性等众多因素的影响, 使智能电网具有不确定性、不连续性、时变性、控制复杂等特点, 采用数学模型来完整、准确地描述这个大型复杂动态系统面临严峻挑战^[1]。大规模采集的数据并不代表信息, 信息也并不代表能改善电力系统各类指标的知识, 在某些场景或针对某些操作人员, 纷乱的数据和信息反而是一种负面的效应甚至是灾难^[2-3]。

在人的决策过程中, 其对环境信息的感知、理解和预测的过程被称作态势感知 (situation awareness, SA)^[4-13]。态势感知主要面向不确定强, 人必须介入决策的大型或巨型动态复杂系统, 主要应用领域包括经济、生态、战场^[9]、巨型网络系统^[10]等, 也包括智能电网^[2-3, 14-29]在内。态势可视化是态势感知的人机界面, 是其最核心的组成部分。

在大规模信息技术基础设施基本建成后, 中国电网开始建立电网调度控制监视中心、电力设备运

行检修监控中心、配电网运行与抢修监控中心等监视、监控中心, 采用大规模信息集成和信息抽取, 实现在线大屏多屏展示, 汇集各类信息系统进行核心业务的管控和综合决策; 研究和开发优秀的人机协同态势感知和态势可视化平台, 意义十分重大。

态势建模是态势感知与态势可视化的理论基础, 而态势图建模又是态势建模的核心。本文从智能电网态势可视化图层设计入手, 研究了图形构成、自动生成、存储、态势播放等关键问题, 也简要讨论了态势图形设计评价指标及量测方法, 以此作为历史的动态态势反演与诠释、未来的预测动态态势播放与诠释的一种解决方案。

1 态势感知及其可视化回顾

Endsley^[2, 4-5]最早提出态势感知定义, 认为态势感知是在特定时间和空间下, 操作者基于对当前设备和环境的动态变化察觉 (perception) 和综合 (comprehension), 运用基于分析 (短时工作记忆)、联想 (长时记忆)、规则的预测方式 (projection), 实现任务连续情境的模式识别与匹配并采取相应的对策, 进而达到圆满完成任务的目的。Endsley 也提出了适用于自动化及人机接口系统的态势感知过程。态势管理 (situation management, SM) 是一个有目的的协同过程, 包含搜集感官和信息、感知和识别态势、分析过去和未来的态势, 以及论证、策划和实施行动。

信息可视化是最重要的视觉感知手段, 能充分

收稿日期: 2013-09-09; 修回日期: 2013-12-16。
浙江省自然科学基金资助项目 (LZ12E07001); 国家电网公司科技项目 (ZDK088-2012)。

调动决策者的认知能力,强化对信息的感知和理解;可视化与态势可视化,既存在共性和相互联系,也存在着明显的差异。态势可视化是可视化的高级发展阶段,尤其是指面向态势感知的高级阶段^[6-10]。态势可视化被认为是以用户为中心的强调态势感知优化的显示(可视化)^[2],以有利于操作人员对当前态势有“强健理解(a robust understanding)”。态势可视化属于可视化分析学^[6-8]范畴,关注的重点是意会和推理,其相关的可视化分析工具从海量、多维、多源、动态、时滞、异构、含糊不清、甚至矛盾的数据中综合出信息并获得深刻的见解,能发现期望看到的信息并觉察出没有想到的信息,能提供及时的、可理解的评价,在实际行动中能有效沟通。在战场指挥中,态势感知的可视化技术可帮助快速对复杂的战场进行综合^[9]。文献^[10]认为,态势感知连续萃取环境信息,集成了以前的知识以形成一个连贯的画面,并使用该画面预测未来事件。本文认为,有助于态势感知的信息可视化,均可称为态势可视化,或按照态势感知基本理论^[4-5],它应有助于:①反演历史态势;②分析当前态势;③预测未来趋势。态势建模主要方法包括事件驱动的态势描述和感知识别方法^[5],以及基于本体的态势建模方法^[6]。

态势可视化在电力系统的应用研究几乎与态势理论出现同步^[2-3,14-28]。Overbye 及以他为核心组建的 PowerWorld 公司是美国电力系统可视化的先驱^[14]。2008 年美国能源部西北太平洋国家实验室(PNNL)提出电力系统有意义态势感知(sense making)的概念,认为对模糊态势提出其含义的能力是至关重要的,应支持不确定条件下的决策,并理解人、地方和事件之间的关系,能够预测它们的运动轨迹,以利于采用有效的行动^[17]。文献^[22]认为,以前的可视化基本上是设计者驱动的,能量管理系统(EMS)厂家提供的可视化界面人工维护工作量非常巨大,用户自主性太弱,限制了用户自主发现态势的能力,因此,提出了“数据驱动”的可视化技术,主要内容包括基于公共信息模型(CIM)的数据进行单线图的自动生成,以及提供可视化加工的专门服务系统。文献^[25]讨论了电力系统运行状态可视化,可分为数据显示、运行安全状态显示和运行趋势显示 3 类。其中,数据显示可归结为网络结构、节点数据和线路数据等 3 类基本显示。文献^[26]认为电力系统信息可视化可分为 2D 与 3D 两种方式,探索了 3D 空间可视化不同坐标轴物理量分配时的不同效果。文献^[27]研究了现代 EMS 常见的可视化主题设计,并对 3D 曲面差值算法进行了优化改进。

文献^[28]较为全面地论述了智能电网条件下的

态势感知与态势可视化的关键问题,是本领域一个十分有价值的参考文献。该文提出以调度员思维模式为框架,以可视化界面为功能模块,以互动计算为系统核心的智能电网架构,认为电力系统的可视化将逐步向 2D/3D 图形化、动画发展;提出所谓电网态势是指由各种电网设备运行状态以及用户行为等因素所构成的整个电网当前状态和变化趋势,电网态势感知是指在大规模网络环境中,对能够引起电网态势发生变化的安全要素进行获取、理解、显示以及预测未来的发展趋势,态势感知包括当前态势元素提取、态势评估、电网的能力态、可控态、未来发展趋势预测几个部分。该文提出当前态、发展态、能力态、可控态、评估态作为电网状态特性。本文认为,其评估态可纳入当前态,能力态、可控态可纳入未来态,而要获取十分优秀的当前态、未来态的感知,对历史态的研究尤其是其反演归纳能力至关重要,因此,本文仍以历史态、当前态、未来态来提出对智能电网的态势感知的基本要求。该文认为,态势感知的结果是形成态势分析报告和综合电网态势图,但本文认为,它是态势感知实践的理想目标,现阶段难以在工程中完全实现;正如该文指出的,作为信息融合的过程,电网态势感知的可视化是一个从底层数据到抽象信息,再到获取高层知识的过程,因此加强、加速该过程,是值得学术界、工程界高度关注的。

目前,国内外电力系统可视化研究的主要领域在于 EMS,通过对可视化的细节设计以及图形的动态过程来研究其功效,并没有建立起很好的理论体系;工程实践主要也是从已有的可视化实践案例进行模仿、改进。随着智能电网时代到来,可视化应用将覆盖智能电网规划、设计、运行、控制、调度、营销等各领域,更需要不断实践来进行归纳、总结和发展。对以往的实践大致可总结如下。

1) 单一元件或系统单一特征静态与动态可视化

静态可视化,主要用于展示实物的二维图纸或三维立体,揭示其结构参数或技术参数;而动态可视化,主要是元件的电气、电能量或特性参数、特性曲线随时间的变化。变化分为时间显式或隐式,后者主要是特性曲线,如变压器的绝缘特性曲线、电力系统的稳定域等。

2) 网络系统静态与动态可视化

这里的网络应包括电力网络,也应包括通信网络以及信息流的虚拟网络。目前电力网络可视化得到了较高的应用。对于电力网络而言,静态可视化主要是基于某一个时间断面各类量测的感应、感知的展示,主要对象是电网接线图上 2 类抽象元件(即节点和线路)。而动态可视化,是指随着时间变化的

感应与感知的变化趋势的可视化。

3) 指标的静态与动态可视化

指标可视化是智能电网可视化最高目标。指标静态可视化是指某一时间断面的指标可视化;而指标动态可视化是指其随时间变化的指标变化。

可视化的 2 个原则,可以归纳为如下 2 类。

1) 基于主题的可视化^[27]

自动化、信息化覆盖了依靠传感、测量、传输、信息处理的全自动化过程,也覆盖了人工参与的数据录入、数据处理,且可视化的使用场景与目的均有不同,可视化的形态形式也不尽相同,因此基于主题就成为可视化的一个原则。

2) 基于不同技术形态的可视化^[8]

可视化技术一般可分为:①数据可视化,即将多维数据在 2D 或 3D 空间进行显示的技术;②科学计算可视化,指利用计算机图形学和图像处理技术,将工程测量数据、科学计算过程中产生的数据及计算结果转换为图形图像;③信息可视化,是指将非空间数据的信息对象的特征值抽取、转换、映射、高度抽象与整合,用图形图像等方式表现;④知识可视化,是通过提供更丰富的表达人类所指导内容的方式,采用知识图表、视觉隐喻等可视化技术,以促进群体知识的传播。

从目前全球的发展现状看,智能电网态势感知已逐渐成为未来研究的一个重点。电网的可视化,可分为 4 个阶段:①静态可视;②动态可视;③动态可视的深度理解与可解释;④动态知识发现与动态态势可控。其后 3 个阶段均属于电网态势可视化阶段,是电网可视化发展的未来阶段。态势可视化和一般可视化一样,都是基于物理智能电网(一次电网与二次、三次的信息通信网),其中反映物理电网的点元件、线元件等结构参数、技术参数、背景参数(如地理位置等),以及点线元件之间的连接关系,是态势感知的宿主,其构成的图形在本文中称为态势底图,而在其上的任意动态参数或面向主题的目标参数,将作为态势的表现层,在本文被称为态势表现图。基于这样的分析,有可能形成态势可视化工程的有序实现的轨道。

另外基于态势感知基本理论^[4-5],态势感应和态势感知虽然存在着相互联系,但也存在着明显的差异。态势感应,主要是指动态变化察觉,或基于量测和基于量测对物理系统的扩展计算(电力系统主要是指潮流计算)后的察觉;态势感知,就重在对察觉后的基本数据进行综合、解释和基于不同主题的态势评估。

2 智能电网态势管理概念模型

本文在 Endsley 的模型^[4-5]上对智能电网态势管理进行了细化,其概念层次模型如图 1 所示。

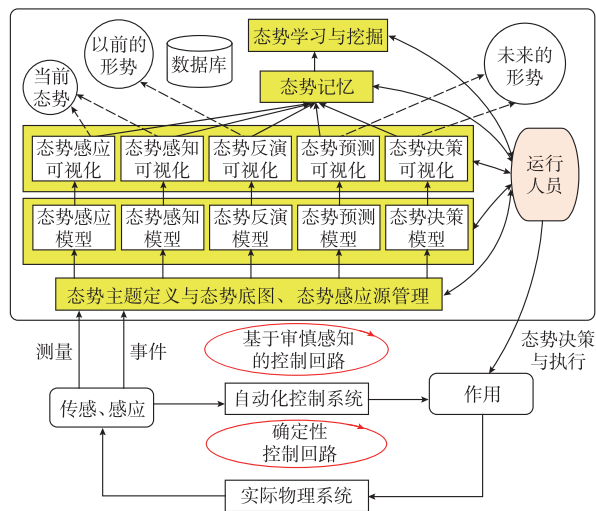


图 1 智能电网态势管理内容及过程

Fig.1 Content and process of smart grid situation management

从图 1 可见,智能电网态势管理存在 2 个控制回路,即确定性控制回路和审慎控制回路,前者可采用闭环的全自动控制系统;而后者需要人类智慧与机器智慧结合才能决策。态势感知与态势可视化,是可视化的高级阶段,主要用于审慎控制回路。

2.1 态势主题定义与态势底图、态势感应源管理

态势主题^[27]是指从智能电网业务需求出发,需要建立的态势分析或态势决策的主题;态势主题获取,主要由人为设定,或由机器智能通过大量数据挖掘所获取的一些现象并加以分析归纳而确定的主题。态势主题包括如下方面。

1) 态势分析的对象:以态势底图的图形化方式描述,而态势底图是指研究对象的物理特征或物理特征加载地理空间信息的图形,包括对象的静态图形及静态参数,如电网电气设备及连接、智能设备及连接等。

2) 态势分析目标:一般选择为研究对象的某一个或一组性能特征或控制目标。

3) 态势感应源管理:与研究对象态势分析目标相关的感应数据或语义的来源、筛选原则、颗粒度选择等。

4) 选择的目标与其来源的基本关系、参数、识别的基本方法等,比如电网潮流计算模型,短路计算模型及参数,电网各类能力态、可控态、评估态等分析模型及参数等。

2.2 态势感应与可视化管理

研究对象的感应包括物理对象运动的全部表象量,如电网各节点和支路的电气量、电能量等。目前的态势感知源,以物理对象状态可观测为配置依据,也可能存在冗余配置,因此需要经过状态估计、潮流计算等,才能获取整个物理系统的全部感应。态势感应的可视化,主要是对这些表象量的可视化,比如电压等高线及着色图等。

2.3 态势感知与可视化管理

态势感知,主要基于整个物理系统感应信息之上进行信息挖掘形成与主题密切相关的感知数据,以探索解析这些感应的内在原因,比如电网电压稳定裕度等。

2.4 态势历史与可视化管理

对历史感应、感知进行记录,并可以进行可视化回顾播放。

2.5 态势预测与可视化管理

对未来态势进行预测并可视化播放。

2.6 态势决策与可视化管理

与态势预测结合,对未来增加改变态势的决策选择,并可视化播放。

2.7 态势记忆、态势学习与挖掘管理

态势感应、感知是态势记忆与学习的主要样本。如果对态势预测也进行历史记录,则可从中进行态势预测误差分析,并进行知识萃取和学习等挖掘管理,以提炼、修正、校正态势预测模型,从而提高态势预测的精度。

2.8 数据库

用于存放数据、图形、算法等数据和规则。

3 态势感知可视化对象建模及核心算法

3.1 态势模型

态势模型由态势感应、态势感知、态势历史、态势预测、态势决策等子模型组成。

态势感知可视化有实时态、历史态、未来态。实时态由感应可视化和感知可视化组成。历史态可视化主要对历史记录的感应、感知图序列按时间进行回放,以解析历史事件与态势。而未来态,基于预测的感应图、感知图序列,进行按时间地播放,以对未来的态势进行分析和评估。

3.2 态势图模型

所谓态势图,就是针对研究对象某一个局部或全部物体的特性或特征进行其时间或空间发展演变的图形方式。态势图由态势底图和态势表现图构成,如图2所示。举一个简单例子:以电网架空线路为研究对象,其特性之一的电气特性如线路电流,其

长期带负载的热稳定性是其特征;长期大电流通过,导线由于热效应产生变形,下垂加大的趋势一般不能直接测量,但需要感知。因此,电网架空线路将作为底图,态势感应图就是基于电网系统对其线路通过的电流值随时间的图形描述,如采用电流-时间动态曲线,为感应态势图;而导线的下垂过程,如最低点到地面的高度随时间的动态曲线,即是感知态势图。可见,态势感应图为态势底图叠加感应图,态势感知图为态势底图叠加感知图。

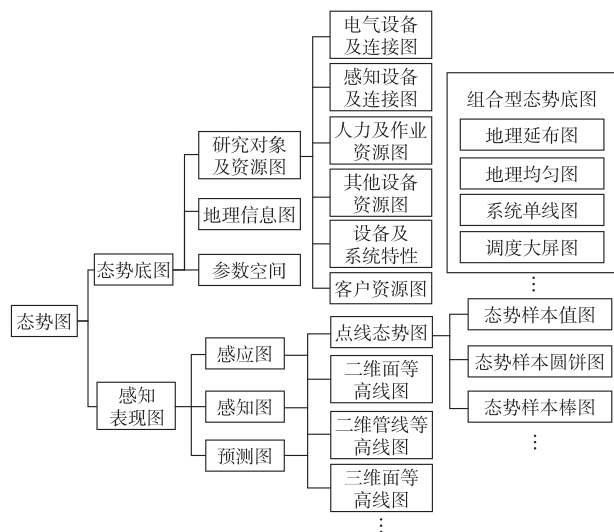


图2 态势图构成

Fig.2 Composition of situation diagram

实时感应、感知态势图由态势底图和感应图、感知图组成。历史感应、感知态势图由历史态势底图和历史感应图、历史感知图组成。预测感应、感知态势图由预测态势底图和预测感应图、预测感知图组成。

3.3 态势底图分类

态势底图可分为如下几类。

1) 研究对象及资源图,主要绘制研究对象的功能特性、静态特性、资源特性等。所谓功能特性,一般采用标准图形标识,如电力系统图里的变压器、断路器等。静态特性,即设备的设计参数(额定值)、开关的设备态位置、电气参数的上下限等。资源特性,主要是设备成组,表现为间隔、电压等级、变电站等,可以以虚框或颜色以示区别。

2) 地理信息图,如果底图引入地理信息,则所有研究对象的位置坐标均需引入地理坐标,以与地理图对应。

3) 参数空间:有一些研究对象是某一对象或系统的参数运动轨迹,此时其态势底图主要以参数空间形式出现,不同维度的参数空间可以引入二维、三维乃至多维的罗盘图等。

态势底图的属性包括如下方面。

1) 电网的静态模型, 其属性包括电网设备的功能、种类、技术参数等, 对应的是电网单线图; 当某些属性发生变化, 需要重新绘制单线图时, 应启动态势底图的重新生成。

2) 对应的地理背景特性, 如道路、河流等; 如果当某些属性发生变化, 而要重新绘制地理背景时, 应启动态势底图的自动生成。

历史态势底层应有版本号, 版本号可以是其自动生成的时间戳。

在智能电网中, 研究对象及资源图至少可以分为 6 类: ①电气设备及连接层, 即电气设备及连接图, 是最关键的研究对象; ②感知设备及通信连接图, 主要是指独立存在的智能终端(智能电子设备)以及它们之间存在的通信网络; ③人力及作业资源图, 主要包括各种人力资源能力及位置、作业资源能力及位置等^[30]; ④其他设备资源图, 比如从电网设计角度出发, 可开发利用的可再生能源资源分布等; ⑤设备及系统特性, 该图相对于设备与系统的参数空间而言, 描述设备的参数空间限制; ⑥客户资源图, 主要描述客户的特性, 如用户类型、用电特征类型等, 主要用于电网特性与客户特性的匹配分析等。

对于态势底图, 可以是图 2 所示的分层态势图的某一类图, 或某几类图的组合, 其组合形式可以表现为带地理信息的地理延布图或带地理相对位置的均匀图等, 也可以表现为不带地理信息的系统单线图等。这些组合往往需要根据主题的需求进行选择, 如带精确地理信息的底图, 即由地理位置如经纬度的地理信息底图与设备及接线地理延布图所构成; 此类底图只适用于与检修、派工相关的专题。

3.4 态势表现图

所有态势感应、感知、态势预测图均是在研究对象的分布面即态势底图的基础上, 对某一时刻、某一参数或指标的形势进行其图形绘制的, 分别称为感应图、感知图、预测图, 统称为态势表现图。

态势图由态势底图叠加态势感应、感知或预测图形构成。这些态势表现图又可分类为如下几种。

1) 点线态势图: 主要是态势底图的研究对象的点(如电网节点)、线(如电网支线)为态势渲染目标, 点渲染包括在节点上展示该节点的颜色、超限点闪烁或增设柱形标志、圆饼标志等方式, 线渲染包括在线的中部位置加载动画箭头、线颜色、线粗细方式或增设柱形、圆饼等标志展示。如果对所有态势底图上的点、线都做渲染, 可能使得识别率降低, 因此一般点线需做筛选。要注意的是, 点线渲染方式也存在一定的遮掩问题, 需要在态势底图制作或渲染选择时进行优化选择和设计。

2) 二维面等高线图、二维管道等高线图: 前者在整个态势底图上进行等高线绘制和着色, 后者仅在线路两侧形成一定宽度的区域进行等高线绘制和着色。

3) 三维地貌图: 三维地貌图与等高线图类似, 但二维等高线图没有三维地貌图的遮挡问题, 为解决三维地貌图的遮挡问题, 必须引入图形旋转, 因此, 三维地貌图尽管可立体和直观化, 但制作成本更为巨大, 因此应用比较少; 同时, 二维等高线图可以结合点线态势渲染, 因此应用效果更好。

在许多场合, 态势感应与态势感知必须同时展示, 比如点线渲染时, 常以点限制值、线限制值, 或以实际感应值与目标值的对比, 来感知目前形势与理想形势或危险形势的距离。

3.5 感应图、感知图和底图的严重依赖关系

需要强调指出的是, 对于大部分感应图, 如电压等高线图等, 严重依赖于其电压节点的坐标位置, 或底图的布局布线, 因此感应图严重依赖于底图; 同样, 感知图不仅严重依赖于底图, 也依赖于感应图, 因为许多感知基于对感应图的挖掘和分析的结果。举一个简单的例子, 一段架空线路以直线图形作为其态势底图和以实际弯曲线作为其态势底图的电压与线路长度的感应或感知图形态势如图 3 所示。

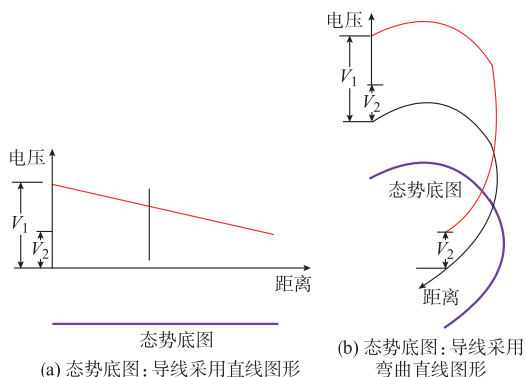


图 3 底图严重影响态势感应/感知图的一个例子
Fig.3 A simple case indicating the great impact of base diagram on reaction and perception diagrams

3.6 态势感知可视化对象建模

图 4 为态势感知可视化的统一建模语言(UML)建模。

3.7 态势计算及预测算法

1) 态势感应算法。由于量测需要投资和运行成本, 因此, 一般采用基于物理系统可观察原则配置量测设备, 并按物理系统本身物理规律, 获取其全貌的其他量; 对于电力系统而言, 潮流计算、状态估计、短路计算、热动稳定校验计算等都是态势感应的主要算法。

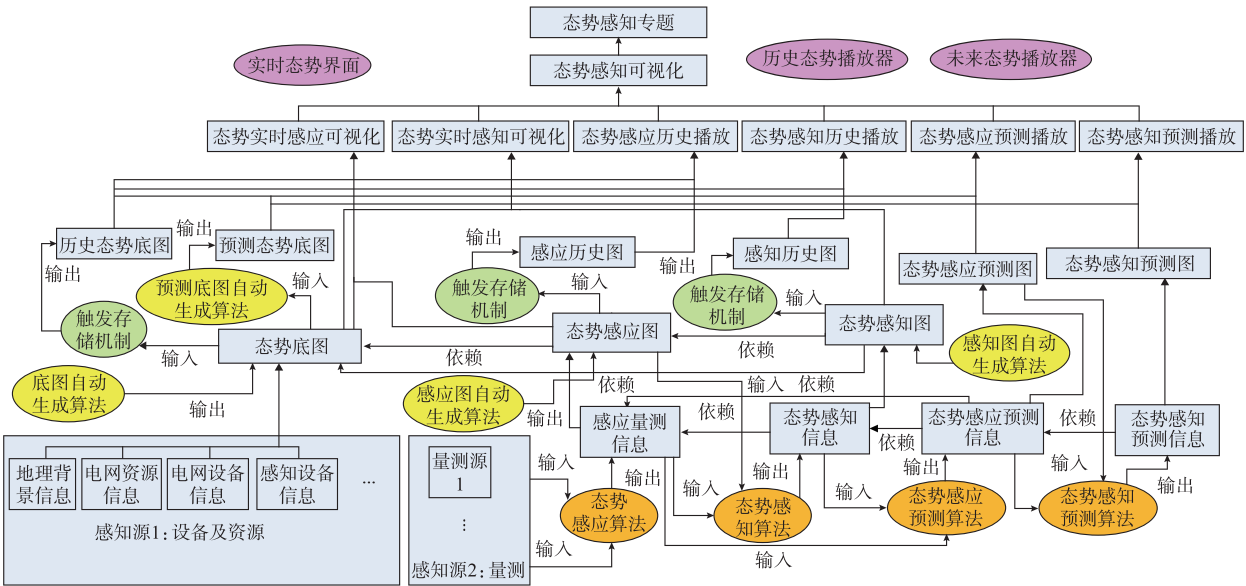


图 4 态势可视化 UML 建模
Fig.4 UML modeling for situation awareness visualization

2) 态势感知算法,其输入除了量测数据以及按照量测数据计算获取的计算量等整个感应数据外,也包括从感应图形提炼的信息;而后者可能挖掘出更多表明态势规律的信息。

3) 态势感应预测算法。该算法与态势感应算法类似,即对所有的量测量采用预测方式或计划运行方式等获取。例如:预测期是未来的一天,则日前一般能较为准确地预测第 2 天的负荷过程,开关过程可能按照日前的电网计划运行方式获取;如果第 2 天存在涉及态势底图的计划变更,也应该考虑在内,详细内容在第 5 节还有描述。

4) 态势感知预测算法。该算法与态势感知算法类似,基于预测的态势感应以及预测态势感应图,进行态势感知预测。

4 态势图生成、动画播放、存储机制

4.1 态势图的静态与动态展示方式

所谓静态态势图,是指实时态势图在某一时刻的快照或图片展示。如果这些静态态势图按照时间滚动连续地展现其随时间的变化过程,就具备动画片播放功能,则会观察到态势随时间的变化,即动态态势图的动画展示方式。

4.2 图形自动生成算法

图 5 给出了态势图的生成、存储时序。有如下 4 种图形自动生成核心算法。

1) 态势底图自动生成:主要是按照态势主题设计的研究对象生成一个能清晰表明研究物体的图形。

2) 感应图自动生成:根据量测量及计算获取的感应量测数据,生成清晰的感应图。同时,该算法也用于预测感应图的自动生成。

3) 感知图自动生成:根据计算的态势感知信息,生成清晰的感知图。同时,该算法也用于预测感知图的自动生成。

4) 预测底图自动生成:在未来预测时段内,如果存在态势底图的计划变更,则底图应该做相应地自动变更,即预测底图的自动生成。

4.3 实时态势图

实时态势图由实时态势表现图与最新版本的态势底图合成。

4.4 历史态势图及触发存储机制

历史态势图,由触发机制对实时态势图进行存储自动形成。设计如下 3 种态势图触发存储机制。

1) 当电网拓扑发生变化时,态势底图应该重新生成;同时将实时态势感应图、感知图命名加时间戳作为图形文件扩展名存储,形成历史态势底图库,其中的图形文件称为历史底图图片。

2) 当有事件发生或开关发生变位时,将实时态势感应图、感知图命名加时间戳作为图形文件扩展名存储。

3) 定时存储,当定时计数器翻转时,将实时态势感应图、感知图命名加时间戳作为图形文件扩展名存储。

后 2 项存储的图形形成历史态势感应图库及历史态势感知图库,其中的图片称为历史感应图片、历史感知图片。

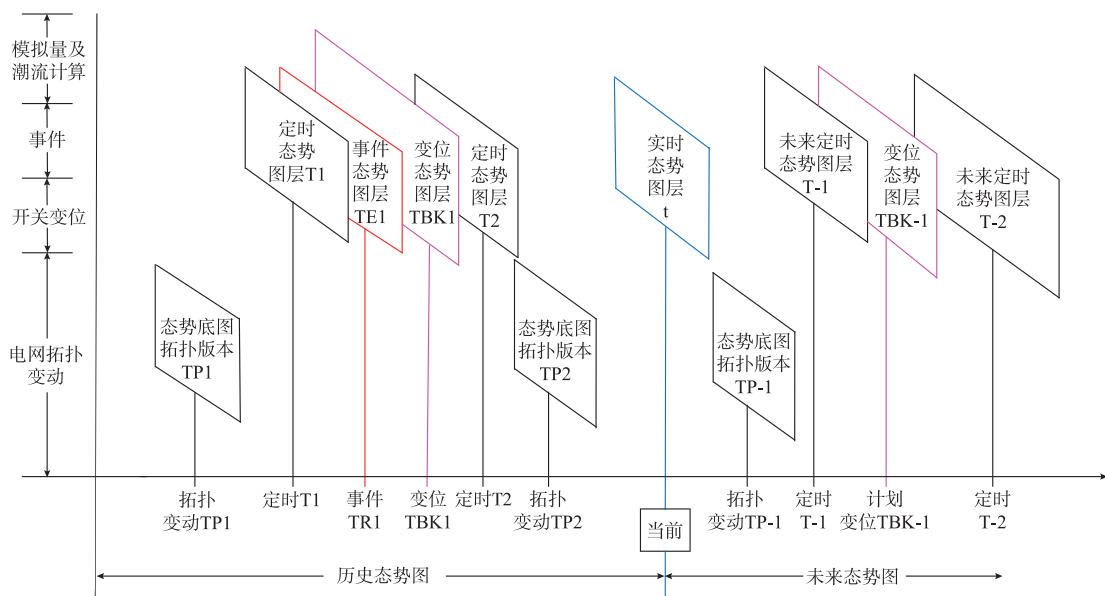


图5 态势图生成、存储时序
Fig.5 Sequence of situation diagram generation and store

4.5 未来给定时段的态势预测图生成和刷新

假设未来态势分析为一天,且未来一天:①可能发生的开关变位计划已知;②定时时段的负荷已知;③可能发生静态网络拓扑变化或设备参数变化的时间已知;则对未来的定时时刻、每个开关变位时刻,以及每个静态网络拓扑变化或设备参数变化时刻,均进行潮流计算,同时对这些时刻的态势感知、感应图进行计算并自动成图,并以感应、感知图命名加时间戳作为图形文件扩展名存储。对网络拓扑变化的态势底图进行计算并自动成图,同时以态势底图命名加时间戳作为图形文件扩展名存储。以上形成的图片将存放在专门的预测感应图库和预测感知图库,其中的图片称为预测感应图片、预测感知图片。

对于这些预测感应图片、预测感知图片,除其本身所带预测的时刻时间戳外,还需要增加一个生成图片的时间戳,以记录其进行预测的当时时刻,从而便于未来进行预测误差分析。采用滚动预测的机制:在下一个周期中,如果环境没有发生变化,即影响预测的网络结构、负荷、开关位置等均没有变化,则其预测图片将沿用上一周期生成的预测图片,且只需生成本周新增一个定时周期的预测图片即可,这样可节省时间和存储空间。如果下一个周期的预测环境发生变化,则需要全周期的预测计算,并重新制作预测感应图片、预测感知图片,存储的图片的扩展名为对象编号+图片性质+预测时间戳+修正序号+制作时间戳,这样可导入:①基于态势(图)预测误差分析;②基于误差分析的态势(图)预测改进算法。

4.6 3个可视化插件或播放器

1)实时态势播放器。最新版本的态势底图叠加实时感应图,形成态势感应图形界面;最新版本的态势底图叠加实时感知图,形成态势感知图形界面。

2)历史态势播放器。对于给定的历史时间段,对历史底图图片、历史感应图片、历史感知图片进行检索、拼接,形成该历史时段的连续图片,通过历史态势播放器以动画播放形式进行播放。

3)预测态势播放器。对于给定的未来预测时间段,对历史底图图片、历史感应图片、历史感知图片进行检索、拼接,形成该历史时段的连续图片,通过历史态势播放器以动画播放形式进行播放。

4.7 态势数据与图片存储结构

采用底图、感应图、感知图分离的图片存储方式最节省空间,且具有检索快速、组装及调用方便等优点。图片格式可采用可扩展矢量图形(SVG)格式。

5 态势图形设计的几个关键评价指标

文献[25,29]给出了针对可视化图形的一些评估方法。本文从态势图形角度,提出新的评估算法。

5.1 态势底图的可识别度

以电网各类单线图为例,其识别的指标有:①线路交叉数量;②节点布局均匀度;③单线路的最长距离。详细可参见文献[29]。

5.2 态势表现层的察觉度

等高线图是地貌图形的等高线在平面上的投影,因此是一一对应的,可统一采用等高线的察觉度指标:①二维等高线的峰、谷个数;②等高线数量;③闭合等高线的弯曲度。若三值数字较小,表现层

的察觉度比较高。

5.3 态势表现层的遮掩度

无论是采用 3D 展示,或在 2D 平面上加载柱形或约束墙等标识,由于还是平面显示,要考虑遮掩问题,或采用图形可旋转方式;这些均增加了图形生成和展示的难度。另外,除了图形的清晰度、态势可察觉度外,算法的快速性也是最重要的指标。

6 结语

中压配电网是直接决定用户供电质量和供电可靠性的电网。变电站 10 kV 出线量测在变电站监控中早已存在;随着公用变压器终端、专用变压器终端全覆盖,中压配电网末梢的稳态电气量测就基本齐全了;同时,中压网络中的开闭所、环网柜、电缆分支箱的远方采集也逐渐建立,另外架空线分支也开始安装带通信的故障指示仪,因此,中压配电网静态及故障态的态势感知与态势可视化已逐步具备了条件。利用这些量测数据进行每个时间断面的配电网潮流计算,可以获取网络所有节点及线段的电气量,可以制作即时态势图片,并进行在线实时态势可视化展现。这些即时态势图片进行带时标的图片存储,或利用历史量测数据及潮流计算制作历史态势图片,通过历史给定时段内的态势图片的合成,可进行态势可视化播放或历史态势反演,以了解 and 解析历史态势形成的原因。对于未来给定时段(如一天),如已知计划停电等与配电网运行方式相关的预计操作,并进行给定时间间隔(如 15 min)的负荷预测,则可进行潮流计算,并制作未来各时段预测态势图片,再将它们合成,则可进行未来态势图播放,以预测未来态势的发展。为此,专门开发了基于 SVG 的配电网态势感知与态势可视化平台,并进行了应用。应用中也发现了基于现有地理接线图或馈线单线图作为态势底图的缺陷,因此,尝试提出了适用于配电网态势分析的以变电站为中心的配电馈线辐射图形,取得了良好效果,将在后续文章中详细介绍。

智能电网态势感知与态势可视化是一个崭新的课题,本文在其工程实践实现路径、关键技术总结的基础上,尝试在态势可视化工程应用理论和方法上有所突破。

参考文献

[1] 鞠平,秦川,黄桦,等.面向智能电网的建模研究展望[J].电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping, QIN Chuan, HUANG Hua, et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 1-6.
[2] ENDSLEY M R, CONNORS E S. Situation awareness: state of the art[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting;

Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 4p.
[3] 朱全胜,李卫东,刘尧,等.提高紧急情形下 EMS 人机交互能力的探索[J].电力系统自动化,2009,33(16):91-95.
ZHU Quansheng, LI Weidong, LIU Rao, et al. Study on improving EMS human-computer interaction ability in emergency circumstances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 91-95.
[4] ENDSLEY M R. Situation awareness in dynamic human decision making: theory [M]. GILSON R D, GARLAND D J, KOONCE J M. Situational awareness in complex systems. Daytona Beach, FL, USA: Embry-Riddle Aeronautical University Press, 1994: 27-58.
[5] SA technologies [EB/OL]. [2012-12-10]. <http://www.satechnologies.com/>.
[6] WONG P C, THOMAS J. Visual analytics[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2004, 24(5): 20-21.
[7] MACKINLAY J D, HANRAHAN P, STOLTE C. Show me: automatic presentation for visual analysis[J]. IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(6): 1137-1144.
[8] 洪文学,王金甲.可视化 and 可视化分析学[J].燕山大学学报,2010,34(2):95-99.
HONG Wenxue, WANG Jinjia. Survey on visualization and visual analytics [J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(2): 95-99.
[9] FEIBUSH E, GAGVANI N, WILLIAMS D. Visualization for situational awareness [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2000, 20(5): 38-45.
[10] LIVNAT Y, AGUTTER J, SHAUN M, et al. Visual correlation for situational awareness[C]// IEEE Symposium on Information Visualization, October 23-25, Minneapolis, MN, USA: 95-102.
[11] MA K L, MUELDER C W. Large-scale graph visualization and analytics[J]. Computer, 2013, 46(7): 39-46.
[12] CARDELL-OLIVER R, LIU W. Representation and recognition of situations in sensor networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(3): 112-117.
[13] de BOER R C, LAGO P, TELEA A, et al. Ontology-driven visualization of architectural design decisions [C]// Joint Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture 2009 & European Conference on Software Architecture, September 14-17, 2009, Cambridge, UK: 51-60.
[14] OVERBYE T J, WEBER J D. Visualization of power system data[C]// Proceedings of 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2000, Hawaii, USA: 7p.
[15] KLUMP R, DOOLEY G, WU W. Displaying aggregate data, interrelated quantities, and data trends in electric power systems [C]// Proceedings of 36th Hawaii International Conference on System Sciences, January 6-9, 2000, Hawaii, USA: 10p.
[16] SUN Y, OVERBYE T J. Visualizations for power system contingency analysis data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 1859-1866.
[17] GREITZER F L, SCHUR A, PAGET M, et al. A sense making perspective on situation awareness of power grid[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 20-24, 2008, Pittsburgh, PA, USA: 6p.
[18] WANG J, HU Y, JOHNSON A, et al. System requirements

- of visualization platform for wide area situation awareness system [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 5p.
- [19] DIAO R S, VITTAL V, LOGIC N. Design of a real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 957-965.
- [20] WANG J, HU Y, JOHNSON A, et al. System requirements of visualization platform for wide area situation awareness system [C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minneapolis, MN, USA: 5p.
- [21] QI H R, LIU Y L, LI F, et al. Increasing the resolution of wide-area situational awareness of the power grid through event unmixing[C]// 44th Hawaii International Conference on System Sciences, January 4-7, 2011, Hawaii, USA: 8p.
- [22] ZHU J, ZHUANG E, IVANOV C, et al. A data-driven approach to interactive visualization of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(4): 2539-2546.
- [23] Situational awareness (SA) in SCADA EMS/GMS/DMS (data visualization and alarm processing) [EB/OL]. [2013-05-09]. <http://www.emmos.org/training/2011training.html>.
- [24] SCHNEIDERS C, VANZETTA J, VERSTEGE J F. Enhancement of situation awareness in wide area transmission systems for electricity and visualization of the global system state [C]// 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, October 14-17, 2012, Berlin, Germany: 9p.
- [25] 刘尧,李卫东,吕阳.电力系统运行状态可视化技术综述[J].电力系统自动化,2004,28(8):92-97.
LIU Rao, LI Weidong, LÜ Yang. Surveys on power system operating state visualization research [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 92-97.
- [26] 陈玮,罗毅,涂光瑜,等.动态监视下电力系统状态的可视化[J].电力系统自动化,2004,28(8):68-71.
CHEN Wei, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Power system status visualization for dynamic monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 68-71.
- [27] 陈佳,孙宏斌,汤磊,等.电力系统控制中心三维可视化技术及其实时应用[J].电力系统自动化,2008,32(6):20-24.
CHEN Jia, SUN Hongbin, TANG Lei, et al. Three-dimensional visualization technique for power system control centers and its real-time applications [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 20-24.
- [28] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等.智能电网下可视化技术的展望[J].电力自动化设备,2010,30(1):7-13.
LIU Junyong, SHEN Xiaodong, TIAN Lifeng, et al. Prospects of visualization under smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 7-13.
- [29] 章坚民,叶义,陈立跃,等.基于新型力导算法的省级输电网均匀接线图自动布局[J].电力系统自动化,2013,37(11):107-112.
ZHANG Jianmin, YE Yi, CHEN Liyue, et al. A novel focer-direction algorithm and its application in automatic generation of the uniformly-distributed provincial transmission power grid diagram[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 107-112.
- [30] 章坚民,吴鑫淼,陈耀军,等.供电公司移动作业排班调度优化模型及算法[J].电力系统自动化,2013,37(14):81-88.
ZHANG Jianmin, WU Xinmiao, CHEN Yaojun, et al. Optimal scheduling and dispatching modeling for electric utility mobile workforce and its algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 81-88.

章坚民(1962—),男,通信作者,教授,副总工程师,主要研究方向:电力及能源系统自动化、信息化建模及优化运行。E-mail: zhangjmhzcn@hdu.edu.cn

陈昊(1989—),男,硕士研究生,主要研究方向:智能电力系统运行与控制。E-mail: 348106661@qq.com

陈建(1965—),男,高级工程师,主要研究方向:智能电网信息系统。E-mail: Chen_jian@zj.sgcc.com.cn

(编辑 万志超)

Smart Grid Situation Awareness Diagram Modeling and Conceptual Design of Situation Awareness Visualization

ZHANG Jianmin^{1,3}, CHEN Hao¹, CHEN Jian², ZHOU Minglei², ZHUANG Xiaodan², CHEN Yaojun³

(1. College of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Information and Communication Division of State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310006, China;

3. Zhejiang Creaway Automation Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310012, China)

Abstract: A conceptual model for smart grid situation management is provided together with the object model of situation awareness visualization as well as the core algorithm. The core of situation visualization is the situation diagram modeling. A situation diagram constitution model is put forward, and a real time situation diagram generation scheme and a condition trigger storage scheme for historic diagrams have been designed. The stored historic diagrams with time stamp can be assembled for historic situation play back of historic situation explaining and reasoning. A graph generation scheme for future situation prediction is also presented from which future situation visualization is accessible. The judgment criterion for situation diagram is also discussed and it is observed that the base graph selection will have a serious impact on the performance of situation induction as well as situation perception. The engineering application theory and method under discussion have been applied in the electric power distribution network situation awareness visualization.

This work is supported by Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LZ12E07001) and State Grid Corporation of China (No. ZDK088-2012).

Key words: smart grid; situation management; conceptual design; situation awareness visualization; situation diagram modeling; situation diagram; situation diagram generation; situation diagram play