

智能电网广域输电系统可视化

Thomas J. Overbye^{1*} and James Weber²

摘要: 安装大量新型传感器和通信设备,并修建用于储存和管理这些设备收集的数据的计算基础设施,是建立输电系统“智能电网”的第一步。对设备进行大量投资之后,当前的关注点是开发大规模数据集的分析和可视化方法。大量新数据的最直接的应用是数据可视化。本文介绍了过去数年内电力行业针对数据可视化所开展的一些可视化技术的调研。这些技术包括饼图技术、动画技术、等高线技术、时变图技术、基于地理的显示技术、图像融合技术和数据聚合技术。本文还着重介绍了“迷你图”新概念,用这种相当于文字大小的图形显示大量时变数据是一种极为有效的方法。

关键词: 电力系统,广域可视化,潮流,暂态稳定性,智能电网,迷你图

1 引言

可靠电网对现代社会运行至关重要。很多时候,电能无处不在,使用电源插座便可轻松获取。同时,这些插座还是某些世界最大、最复杂机器的关口。集中式供电起源于19世纪80年代初,当时只有在100 V的电压下运行的直流电(DC)系统,并且仅能为少量用户提供电能。在接下来的一个世纪里,互联电网迅速发展,其输电电压高达1000 kV,可覆盖多个国家甚至多个大陆。美国国家工程院将电气化作为20世纪的顶尖科技[1],并称该技术已经改变了世界!

然而,在20世纪发展起来的电网仍需继续发展以满足我们进一步的需求。发展包括整合大量可再生能源,如风能和太阳光电(PV),从而满足用户对更高可靠性的

需求。为满足此类需求,电网的传感能力、通信能力和计算能力正在被快速提高,这些变化一般被视为“智能电网”的一部分。

毫无疑问,智能电网正在通过更多的传感和嵌入式自动控制来提高电网的智能性。这种智能化确实非常有益,但它也使电网更加复杂,这就需要不断改善工具,帮助“电力行业”人士设计和运行未来的智能电网。过去数年内,人们在电力系统可视化和分析领域做了诸多努力,文献[2]为2009年的一份有用的总结。本文旨在概述电力系统可视化,其中涉及当前行业内广泛使用的传统技术和可促使智能电网向前发展的某些新成果。本文重点关注广域可视化,其目标是增强对大规模系统的态势感知能力。

2 电网运行和电网失效概述

首先,简要描述电网运行原理和电网失效原因是很有必要的。任何电网均含有三类主要部件:产生电能的发电部件、消耗电能的负荷和将电能从发电机传输至负荷的电线。电线通常分为两类:第一类是输电系统,通常在100 kV以上的电压下运行;第二类是配电系统,在100 kV以下的电压下运行。在中国,最高的传输电压为1000 kV;在北美洲,最高的传输电压为765 kV。输电系统通常已经网络化,各母线(节点)都有多条线路,这样可以提高输电系统的可靠性。与此相反,配电系统通常为放射状,因此任何部件失效都会导致局部停电。包括母线在内的特定地理位置的电气设备被称为变电站。所有大型电网均为交流电(AC),南美洲部分地区和北美洲的

¹ University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA; ² PowerWorld Corporation, Champaign, IL 61820, USA

* Correspondence author. E-mail: overbye@illinois.edu

Received 20 September 2015; received in revised form 25 November 2015; accepted 30 November 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文: Engineering 2015, 1(4): 466-474

引用本文: Thomas J. Overbye, James Weber. Smart Grid Wide-Area Transmission System Visualization. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015098

频率为60 Hz，而世界其他绝大部分地区的频率为50 Hz。高压电网为三相，与拥有相同数量输电线的单相系统相比，三相系统传输的电能是单相系统的两倍。单相系统通常只用于向终端用户提供低压(< 600 V)电能。

在互联AC电网中，所有发电机均同步(或阶段)运行，也就是说，它们通常具有完全相同的频率。北美有四大AC互联系统，即东部互联(EI)、西部电力协调委员会(WECC)、德克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)和魁北克水利；中国有两大AC互联系统，即国家电网公司(SGCC)和中国南方电网(CSG)。大规模互联系统有两大好处：可靠和经济[3]。鉴于互联系统有成千上万的发电机，其可靠性得到大幅提高，因为即使最大的发电机失效，电灯仍然可以点亮。从经济方面来看，电网参与者可以在互联系统内任何地点进行电力交易，这样便可以利用1000 km之外的低成本电力。由于电网在高压下运行，总输电损失通常较为适当，北美洲EI的电力损失大概为3%，密度较小的WECC为4%。电力不可直接以AC的形式在不同互联系统之间传输。然而，可以先将AC转换为DC，在不同互联系统间完成传输后再转换回AC。对于长距离输电来说，可以采用高压DC(HVDC)电线，或在互联系统边界点采用AC—DC—AC转换。

与电力系统相关的一个关键的复杂性问题是在运行以及模型、算法和它们后续的可视化方面需要考虑广泛的时间尺度。图1显示了某些电力系统运行的时间尺度[4]。对于本文的广域可视化，最重要的时间尺度为潮流和暂态稳定性。潮流时间帧是在电力公司控制中心观察时对电网的感知。也就是，当电网本身在50 Hz或60 Hz下运行时，如果系统负荷和发电出现变化，线路上平均潮流的变化通常极其缓慢。

潮流时间尺度模型有各种不同尺寸，在规划研究中，65 000个母线模型被用于描述EI，控制中心环境下的模型具有数十万根母线。然而，为了介绍可视化概念，采用更小的理论模型会更加有效。图2显示了采用“电气主接线图”(或“单线图”)的虚拟七母线系统可视化。在单线图中，实际三相装置，如输电线和发电机，用单线表示；母线用较粗的条形表示；发电机用黑色圆圈表示；总负荷用黑色虚线表示；输电线用较细的线条表示；所有装置的有功潮流和无功潮流都有显示；绿色箭头用于指示有功潮流[5]。基于基尔霍夫电流定律(KCL)，各母线的净有功功率和无功功率必须与发电减去母线处负荷的差

值相匹配，这点在图中已经进行验证。作为工程研究中的通用惯例，电压幅值以标么值(pu)显示，实际电压值为其标么值与基准值之积实现标准化处理。因此，在模拟138 kV标称系统的图2所示的系统中，标么值1.04对应143.5 kV。线路上的饼图显示了最大电流限值下的负载百分比。该类限值通常受到热约束，导致电线损失随着其所载电流的平方发生变化。

正常电网运行的基础可以视为基于负荷变化、发电机有效功率输出和其他控制的手动或自动变化缓慢改变的潮流解。为保持准稳态运行，必须调整总发电，使之与总负荷和损失相匹配。母线电压幅值必须保持标么值在0.94~1.06范围内。鉴于电网通常会出现干扰，比如发电机失效或输电线故障，可靠运行还进一步受制于出现该类意外事件时在不违反限值的情况下继续运行的需求。图3显示了图2中母线2和母线3之间线路断电时的系统。两条线路超负荷时，这就不再是可靠的运行点了。如果不采取纠正措施，单一线路停电会导致后续停电，最终造成大范围连锁断电。2003年8月14日北美洲EI便出现过该情况[6]。

稳态可视化也可以在极端广域领域实现。图4给出了潮流的极端广域可视化示例。对于北美四大电力互联系

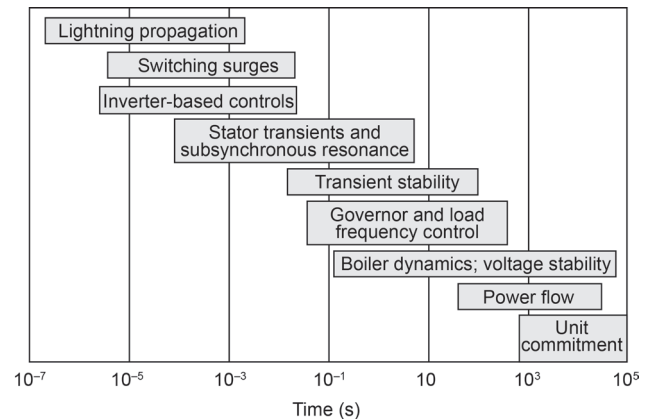


图1. 电力系统运行的时间尺度。

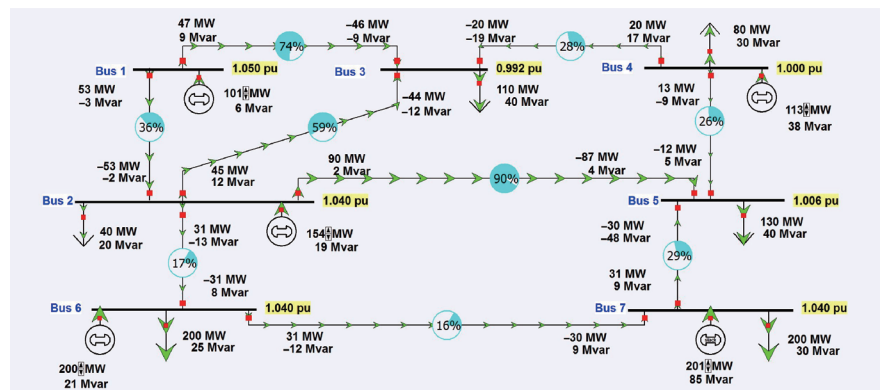


图2. 七母线系统单线图可视化。

统来说，有功负荷显示为白色，有功发电显示为紫色。数据显示的是2015年夏季峰值负荷情况。

考虑电力系统对意外事件的更快动态响应也很重要。例如，图5显示了在两台大型发电机停止工作达2 s的意外事件下，一个具有16 000条母线和3300台发电机的系统的暂态稳定模拟中各母线频率的变化。该意外事件造成比较大的振荡，但系统仍然保持稳定。图5展示了所有的16 000条母线的频率响应，从而非常准确地显示了频率响应的包络线，但是无法确定任何特定母线的响应。该类时变信息的其他可视化方法在第4节中说明。

最后，驱动电力系统可视化的是数据。在工程研究中，该类数据由潮流和暂态稳定软件应用程序提供。由于该类应用程序基于模型，所以，所有所需数据都可以很容易地从软件模拟中获取。潮流被用于提供单个快照，而暂态稳定性提供时变数据，如图5中所示数据，采样率可达每秒几百个点。关键数据包括母线电压幅值和相角、输电线和变压器信息(如MW、Mvar、负载百分比)、负荷/发电值以及母线频率(仅暂态稳定性；对于潮流，频率被假设为固定值)。

对于在线可视化，所有数据均为时变数据，通常由数据采集和监视控制(SCADA)系统提供。SCADA每隔几秒钟便扫描一次系统。虽然SCADA数据对系统运行非常重要，但其扫描速率缓慢的劣势使得暂态稳定性的动态情况无法被观察。同时，以往的SCADA数据不包括电压相角信息。为估计相角从而获得更加完整的系统模型，通常要采用状态估计(SE)[7]。在该方法中，系统参数模型与SCADA状态和模拟测量相结合，以便(通过迭代解)获取潮流解的相似方案。在性能最佳的控制室内，SE大约每分钟运行一次，并且在超过98 %的时间内是收敛的[8]。

显著提高电力系统动态情况直接测量能力和可视化智能电网发展的关键在于相量测量单元(PMU)的广泛布置[9]。PMU采用全球定位系统(GPS)提供的精确时间来确定具有合理精度的电力系统幅值和相角(如电压和电流)以及母线频率。每秒30个至60个样品的数据采集率允许直接观察电力系统动态情况。在北美洲，PMU的布置和使用由北美同步相量计划(NASPI)协调[10]。FNET/Grid-Eye提供的频率、相角和电压幅值的低成本、GPS同步、

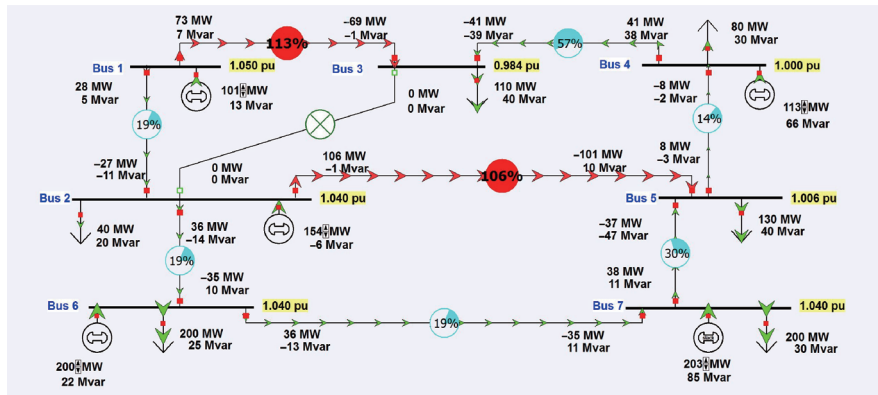


图3. 一条线路停电后的七母线系统可视化。

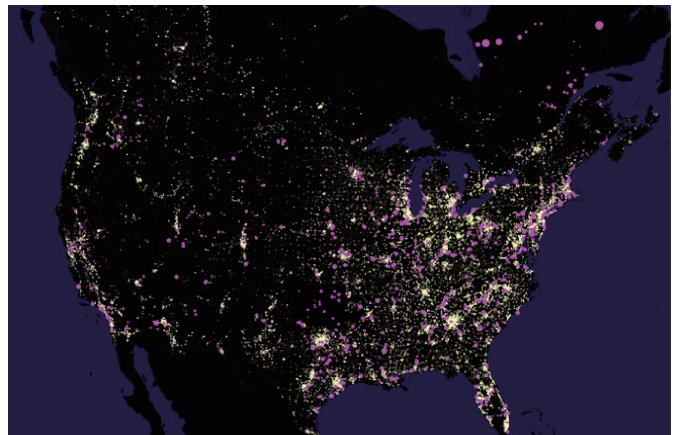


图4. 北美潮流广域可视化数据，显示电负荷（白色）和发电（紫色）情况。

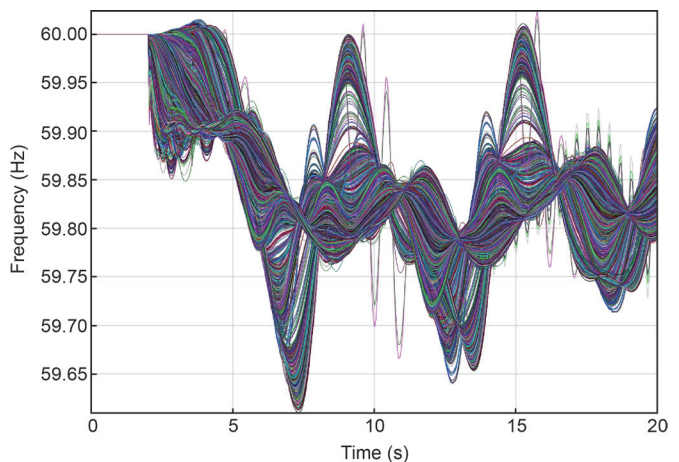


图5. 发电损失意外事件后的大型系统发电机频率。

120 V插座测量是电力系统可视化的另外一个潜在数据来源[11]。

大型互联电网的效益非常可观，但也有一个副作用，即出现问题时会迅速影响大范围区域。这个特点在图6中有所显示，该图总结了电力系统运行的五个基本状态[12]。系统通常处于正常状态，满足所有的约束。广域可

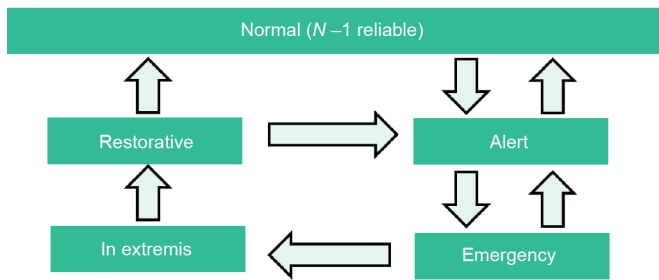


图 6. 电力系统运行状态。

可视化对正常状态很重要，但对其他状态更加重要，因为在其他状态下，调度员的有效决策具有重大的影响。

调度员的行动是否能够防止停电取决于时间范围和事件的严重性。然而，调度员的行动仍无法阻止一些大规模停电。地震是一种能在数秒内引发严重损坏的意外事件。这种情况下，可视化在恢复状态下最有用，因为调度员无法采取任何措施来防止地震造成的物理性损坏。相反，缓慢移动的天气系统(如飓风和冰暴)使调度员有足够的时间采取措施，但无法完全阻止停电。例如，1998年1月发生在北美洲东北部的冰暴造成超过770座输电杆塔倒塌，导致加拿大发生大范围停电[13, 14]。另外一个类似的例子是2012年发生在美国的飓风“桑迪”，此次飓风造成850万用户断电，估计损失为650亿美元[15]。

然而，许多潜在大规模停电有允许调度员做出有效干预的时间帧。一个很重要的例子便是2003年8月14日发生的EI停电，此次停电的影响人数超过5000万，在最后级联前持续了一个多小时[6]；缺乏态势感知是该事件的原因之一。其他例子包括2003年9月28日在意大利发生的大规模停电，时间帧约为25分钟[16]；2012年7月30日在印度发生的大规模停电，受影响人数达7亿，第一个事件和级联之间的时间帧为2小时[17]；2011年9月8日发生的WECC停电，持续了11分钟多结束，缺乏实时态势感知也是该事件的原因之一[18]。此类时间帧的主要原因是基础电力系统动态情况，包括与输电线和变压器发热有关的时间常数、负载调压(LTC)变压器和发电机过励磁限制器的运行。

影响可视化的一个新问题是北美电力可靠性公司(NERC)提出的高影响、低频率(HILF)事件[19]。该类事件是从统计学角度来说不太可能发生、但似乎可信的事件，一旦发生可能会对电网甚至社会造成灾难性后果。该类事件包括大型网络或物理攻击、电磁脉冲(EMP)和地磁扰动(GMD)。在许多该类事件的时间尺度内，有效广域可视化是有帮助的。例如，大型GMD的大陆足迹基本动态情况从几分钟到几小时不等[20]。

3 输电系统可视化现状

广域电力系统可视化对于扰动期间调度员的有效响应和规划人员更好地理解所设计的系统而言至关重要。本节提出了一些有用的和如今广泛采用的技术，这些技术着重于系统现状的快照可视化，而后面的章节则涉及时变数量的有效可视化。

广域快照可视化的目标是提供电网健康相关信息，不会太过详细。此类可视化在非正常运行状态下尤其重要，因为此时的系统状态可能与之前遇到的情况完全不同。例如，系统电压分布可能相当不寻常，线路流量可能与其正常数值相差甚远，可能会有大量的设备停机。图6中“紧急状态”和“极端状态”下的另一个注意事项是控制室人员的压力很大。相对于经验欠缺的人员，经验丰富的调度员能够更好地应对压力，但仍无法保证专家在决策方面的成功。“有时候事故线索可能毫不相关，过分的自信可能会欺骗认知监控，快速的模式识别分类可能会忽略单一无关原因”[21]。确认偏误和过度自信偏误也可能存在[21]。最后，极端事件期间，控制室内“决策者”的人数可能会更多，这就需要有一个团队能够同时看见需要的可视化状态，以便增强态势感知能力和促进达成决策共识。控制室内，这一目标可以通过利用图板实现。图7显示了北美ISO新英格兰控制室和控制室内的大型图板。

概略式系统单线图是能够提供全面电力系统态势感知的可视化技术之一，如图7中的图板所示。有两种常见方法可以显示该信息。第一种是使用非常精确的地理坐标绘制显示图。图4采用了该方法来显示电负荷和发电的位置。该方法的一个优点是它能为显示图提供熟悉的情境，特别是在与非专业人士交流时。另一个优点是允许电力系统信息被其他地理显示图覆盖，如气候数据或其



图 7. ISO 新英格兰控制室。来源：ISO 新西兰公司照片。

他基础设施信息。然而,该方法的一个主要缺点是最感兴趣的电气位置,如高负荷密度城市地区的变电站,地理足迹较小。另外一种方法是采用伪地理设置,在这种布局中显示位置与实际地理位置有一定的关系。采用这种方法时,定位清晰度显示元素在设计考虑中最为重要。图7中的图板使用的就是这种方法。此外,还可以使用演变显示,使元素可以从其实际地理位置动态地移动到其伪地理位置。

概略式可视化,如图7中的图板,可以提供关键变电站和线路状态的汇总。图8显示了该图板某一部分的放大图[2]。在正常运行期间,淡蓝色表示最高标称电压为345 kV的变电站和345 kV的线路,而淡灰色表示115 kV的变电站和115 kV的线路。线路像素厚度的不同数值还可用于强调不同电压等级。输电线路实际功率流方向的箭头用稍暗的颜色来表示。在各变电站矩形框左侧显示变电站最高标称电压母线的最低实际电压(单位:kV)。发电机在线时,变电站发电用棕色小圆圈表示;发电机离线时,变电站发电用深灰色小圆圈表示。发电机ID、功率输出、母线电压值和线路电流也在显示图上用相似的协调配色方案显示。另外一种有用的技术是将缓慢启动的发电机组显示在变电站矩形框上方,将快速启动的发电机组显示在变电站矩形框下方。当对象从正常状态切换到警戒状态时,它们的颜色也随之改变。例如,画一条鲜红色的输电线,并用绿色流向箭头表示短期紧急限值。采用其他颜色的改变来显示其他情况,如用无箭头的绿线表示未使用的输电线。

利用动态尺寸饼图显示违规限值百分比的可视化技术已被证实很有用。图2和图3显示了小规模系统的示例。对于更大的系统,当流量快达到限值或高于限值且线路负载高于负载百分比时,系统就会显示饼图,然后动态增大饼图的尺寸和/或加深颜色。这将导致信息“弹出”,可以利用前注意处理[22]来帮助搜索超负荷线路。经前注意处理的特征例子包括尺寸、颜色和动作。图9演示了该技术,该图通过单线图显示了超过400条输电线和多台变压器的饼图负载,765 kV线路为绿色,345 kV线路为红色,138 kV线路为黑色。采用动态分级和着色使负荷超过100%紧急限值线路上的饼图增大12倍、颜色变为红色,而负荷为85%~100%紧急限值的线路上的饼图会增大10倍、颜色变为橙色。图9中,当负荷超过85%时,单条线路立即变为突出显示。用绿色箭头显

示有功功率流的方向和量级。

然而,实践要求将饼图尺寸增大到可以进行前注意处理的程度,但又不能因为饼图太大而造成过度显示拥挤,这就需要一定的权衡。权衡需求在图10中说明,该图通过断开三条345 kV线路对图9所示系统进行了修改。断开的线路通过带绿色“x”和黑色背景的饼图指示。大量的违规导致难以快速定位最重要的过载。一种解决方法是通过将低压线路和背景混合进行显示过滤,从而突出更加重要的345 kV线路违规。该方法在图11中显示。另外一种方法是动态降低出现的尺寸改变量,这样在显示放大时对象重叠最终会消失。最后,由于某些设备被设计为在高限值百分比下正常运行,如发电机升压变压器,此类设备可以采用不同的标度值。

可视化另外一个重要的量是母线标幺值(电压幅值)。对于广域可视化而言,需要显示的数值数量通常太大,以致无法有效使用单个文本字段。经证实,彩色等值线是一种非常实用的技术[23]。当然,等值线也广泛应用于其他领域以显示空间分布的连续数据,如温度。为了将该技术广泛用于电压幅值可视化,需要解决几个问题。首先,母线电压不连续,而是出现在特定位置。第

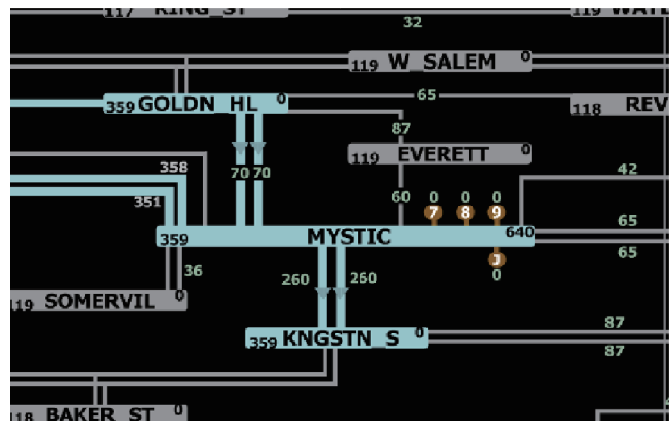


图8. 变电站汇总显示对象的使用。图片由ISO 新西兰公司提供。

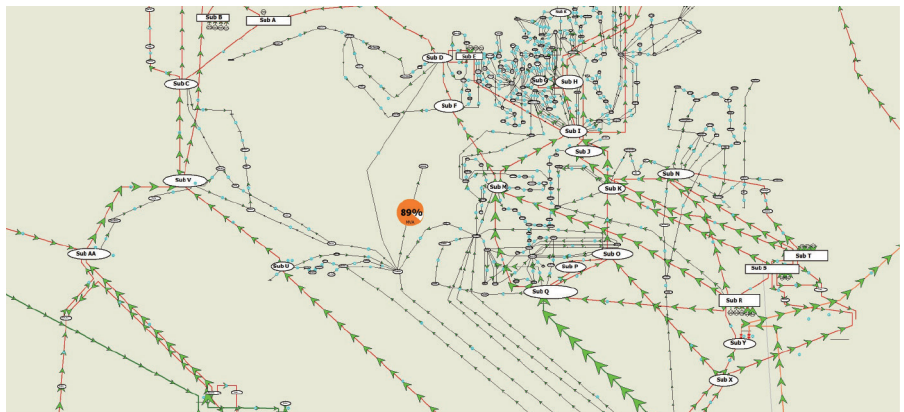


图9. 采用动态尺寸饼图显示大型电网765/345/138 kV系统。

二, LTC变压器以每单位电压幅值的方式引入离散变化。第三, 单线图上相邻的位置从电学角度上来说不一定相邻。该类问题首次在文献[23]中被提出, 并根据行业经验被证实, 且可以被充分解决; 例如, 将等值线限制在某一额定电压水平, 并且必要时对单线图进行适当的建设, 这样, 电学上相邻的母线可以尽可能地被划为一组。有效值被用于提供连续等值线。根据文献[22]中的讨论, 利用不同颜色序列来映射与颜色值相对应的电压。图12显示了图11所示的系统中138 kV数值的电压等值线例子。由于低于标么值0.95的数值可能是问题的原因所在, 很明显, 系统存在电压问题。

大型电力系统可能包含成千上万的输电线和变压器, 与之相关的一个重大挑战便是持续了解整个系统有功潮流的性能。在WECC中, 通过定义“路

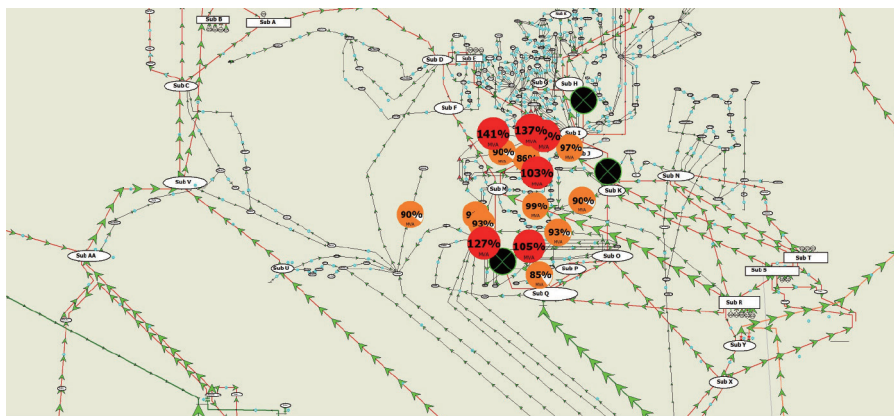


图 10. 出现大量违规的大型电网 765/345/138 kV 系统。

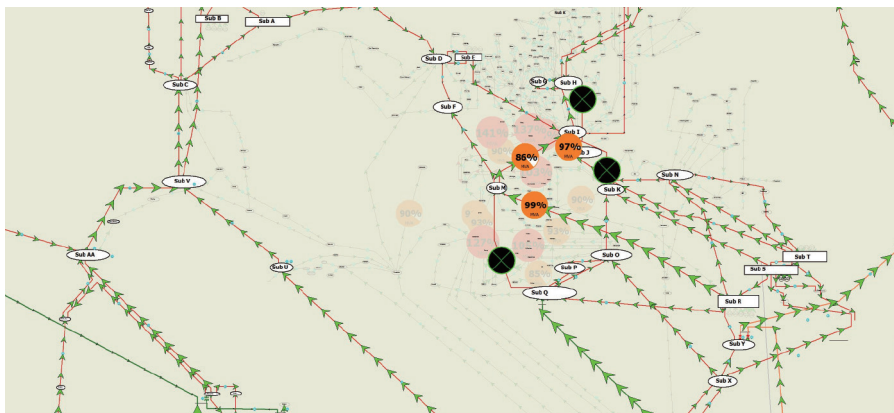


图 11. 采用过滤器突出高压电网的大型电网 765/345/138 kV 系统。

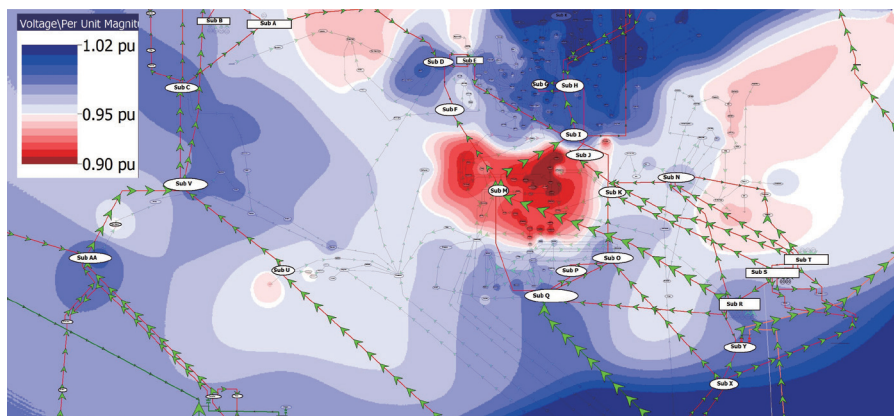


图 12. 图 11 所示的系统中 138 kV 标么值电压的等值线。



图 13. 假设的运行条件下 WECC 路径流量的可视化。

径”(北美洲其他部分称之为“接口”或“关口”)来解决该问题。每条路径代表着若干输电线路或变压器上功率流量之和。图13是WECC中路径可视化示例, 其遵从以下惯例: 无填充椭圆代表椭圆下方着色区域的控制区; 填充椭圆代表自身的小型控制区; 红色、蓝色、绿色和棕色线路分别代表接口中支线与直线交叉的近似切口, 箭头用于规定路径方向; 箭头附近的数字表示路径上的潮流量。该简洁的可视化给出了含有成千上万输电线路和变压器的广阔区域内功率流量的概述。

4 输电系统时变数据可视化

时变信息的显示比快照可视化更具有挑战性, 因为问题的维度随着加入的时间尺度而增加。电力系统有许多不同的时间尺度(如图1所示), 对于此处考虑的广域可视化, 最重要的时间尺度为潮流(分钟)和暂态稳定性(秒)。

通常, 时变信息已经通过长图记录仪表示, 实时连续记录一个或多个数据值。在建模应用中, 如暂态稳定性, 信息通常用基于时间的曲线图表示(图5)。在只显示少量的数值时, 长图记录仪非常有用, 但是要显示广

域可视化所面临的大量数值时，长图记录仪便没那么有用了。长图记录仪的另一个缺点是难以显示相关数据的地理位置。

备选方法之一是使用动画循环来实现数据变化趋势的可视化处理，这对于看过天气雷达的人来说比较熟悉。文献[24]中给出了一个电气控制室的应用，在该应用中，一天内的流量和电压等值线随时间的变化可被快速可视化。该方法的一个优点是它能够利用所有可用的快照可视化，因此该类可视化的用户对它非常熟悉。该方法的缺点包括由于需要时间运行动画循环而不能一眼就看到结果，以及数据趋势可能比较难以理解。

而另一种备选方法是将小型条形图嵌入相关领域附近的现有单线图中[25]。该方法的优点是图表可以在其地理环境中显示，但缺点是空间限制，很难显示大量的图。该问题的一个解决方法是所谓的“迷你图”，文献[26]中将其定义为密集、简单、文字大小的图形。迷你图的理念是在信号中显示时变，且只需要与显示数值的数字串相同大小的显示空间。因此，迷你图是无轴标和数字的图形。很明显，显示空间和所显示信息量之间有一定的权衡。迷你图用数个有效数字显示数据，但是“该想法大概正确而不是完全错误”[26]。在电力系统单线图中， x 轴的时间尺度可以在所有迷你图中通用(如SCADA数据为1 h，暂态稳定性研究可能为20 s)。基于数值类型， y 轴还可以是隐式的，例如，对于输电线流量在75%~150%之间，对于电压幅值的标么值在0.85~1.05之间，对于频率在59.8~60.2 Hz之间。在线应用中，迷你图也可以仅显示接近限值违规的数值。由于迷你图很小，它还可以被嵌入表格显示中，如在电压值显示字段旁边一列显示电压变化。

例如，图14通过首先将母线分组为所谓的“区域”，可视化了图5中16 000条母线和3300台发电机系统的暂态

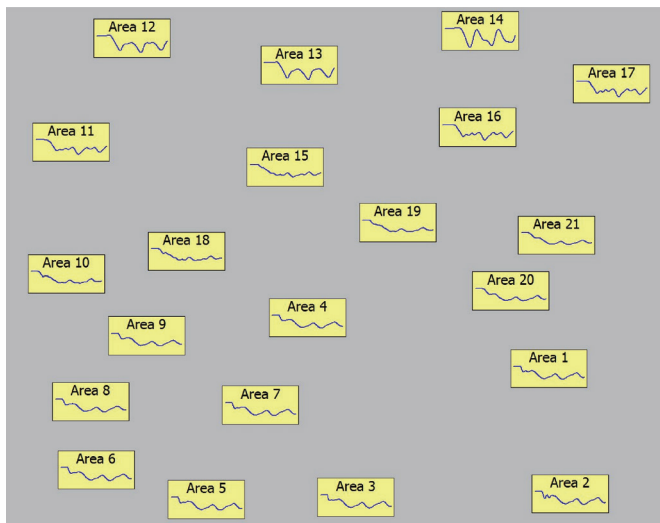


图 14. 区域频率可视化迷你图示例。

稳定性研究频率。区域是潮流和暂态稳定性中的标准数据结构，被定义为一组母线，该术语曾经用于指代某一电力公司的所有母线。图14中，系统有21个区域，区域内的母线数量从16到3735不等。迷你图用于显示区域母线的平均频率响应。因此，每个迷你图显示了图5中一组曲线的平均响应。对于每个迷你图， x 轴和 y 轴尺度与图5中所用的相同。迷你图按照地理位置排列在显示图上，利用文献[27]中给出的地理数据查看方法，采用电力系统模型中包含的母线纬度和经度信息。鉴于数据保密问题，在此并未像图4和图13那样在地理背景上可视化数据。该方法的一个重要优点是它能够快速显示图5所示意外事件频率响应的地理变化。

该方法的一个扩展是在迷你图可视化之前改变数据分组。在之前的示例中，这是通过固定区域成员数据结构来实现的。虽然该方法对电力工程师是有用且直观的，但该方法会漏掉大型区域内可能出现的不同频率响应模式或者可能只在几根母线上出现的异常表现。消除这些可能缺失的一种方法是根据某些特点，如频率响应，首先采用聚类算法对母线或发电机分组[28, 29]。该方法在图15中显示。在图15中，聚类算法被用于图5的结果，迷你图被用于显示各集群中发电机的平均频率响应。确定了十个集群，其大小从单台发电机到超过1500台发电机不等。利用参考文献[27]中的地理数据查看方法来根据集群成员关系为发电机地理位置符号涂色。迷你图被用于显示集群元素的平均频率响应。通过该方法可以快速识别存在极其异常频率响应的若干异常发电机。示例中，该异常响应最终被追溯到建模错误，随后这些错误被改正。该技术最初被用于频率，之后扩展至母线电压幅值，参见文献[29]。该算法即使在成千上万的数据点上运行也是非常快速的。因此，该算法可以通过PMU测量在跟踪模式下进行在线分析。

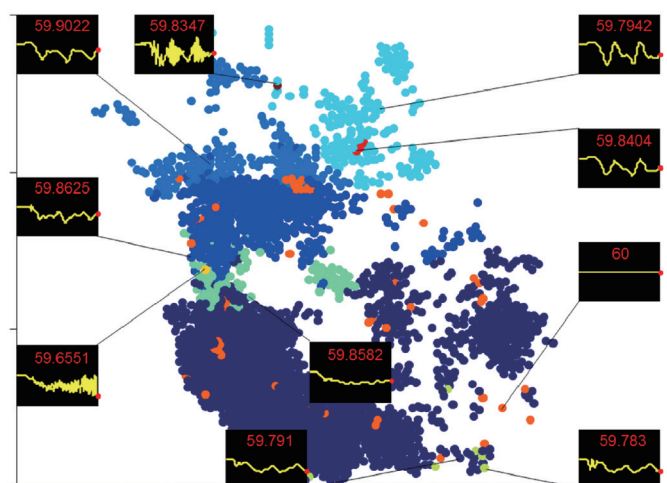


图 15. 群组暂态稳定性频率响应的集群使用示例。

5 结论

目前已经在数据采集设备的安装和用于数据存储的计算基础设施建设方面投入了大量资金。这些投资将为输电系统智能电网打下基础。为了最终证明该投资是有用的，要正确应用这些新数据，以使电力系统以更加有效的方式运营。本文提出了利用这些信息的可视化技术，以帮助提高在线决策和规划决策。虽然其中的某些技术并不是行业内的新技术，但对它们更广泛的应用将证明其实用性。另外，智能电网提供了更多更有用的数据来源，将使可视化更有价值。本文还提出将迷你图作为重要的辅助可视化工具，它可以利用新测量装置(如PMU)更容易粒状化的时变性质。鉴于智能电网传感器的可用数据还会不断扩展，广域电力系统可视化将持续发挥至关重要的作用，因此，有必要开展进一步研究和开发。

致谢

笔者特此感谢美国电力系统工程研究中心(PSERC)和美国国家科学基金会(1128325)给予本文中所述部分工作的资助。

Compliance with ethics guidelines

Thomas J. Overbye and James Weber declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- National Academy of Engineering. Greatest Engineering Achievements of the 20th Century. 2015. <http://www.greatachievements.org/>
- Electric Power Research Institute. Technology assessment of power system visualization, 1017795. Palo Alto: EPRI, 2009
- M. Kezunovic, J. D. McCalley, T. J. Overbye. Smart grids and beyond: Achieving the full potential of electricity systems. *Proc. IEEE*, 2012, 100 (Special centennial issue): 1329–1341
- P. W. Sauer, M. A. Pai. *Power System Dynamics and Stability*. Champaign: Stripes Publishing, 2007
- T. J. Overbye, J. D. Weber. Visualization of power system data. In: *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Maui, HI, USA, 2000
- U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: Causes and recommendations. Washington, D.C.: US Department of Energy, 2004
- F. C. Schweppe, J. Wildes. Power system static-state estimation, Part I: Exact model. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 1970, PAS-89(1): 120–125
- PJM Operation Support Division. PJM manual 3A: Energy management system (EMS) model updates and quality assurance (QA), revision 09. Audubon: PJM, 2015
- A. G. Phadke, J. S. Thorp, M. G. Adamiak. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency, and rate of change of frequency. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 1983, PAS-102(5): 1025–1038
- Pacific Northwest National Laboratory, Electric Power Research Institute. North American Synchrophasor Initiative homepage. 2015. <https://www.naspi.org/>
- The University of Tennessee, Oak Ridge National Laboratory. FNET/GridEye. <http://powerit.utk.edu/fnet.html>
- L. H. Fink, K. Carlsen. Power/energy: Operating under stress and strain: This, part two of the “blackout” series, defines control objectives for various levels and types of emergencies. *IEEE Spectr.*, 1978, 15(3): 48–53
- J. F. Hauer, J. E. Dagle. Consortium for electric reliability technology solutions: Grid of the future white paper on review of recent reliability issues and system events, PNNL-13150. Richland: Pacific Northwest National Laboratory, 1999
- T. J. Overbye, D. A. Wiegmann. Reducing the risk of major blackouts through improved power system visualization. In: *Proceedings of the 15th Power System Computation Conference*. Liege, Belgium, 2005
- N. Abi-Samra, J. McConnach, S. Mukhopadhyay, B. Wojszczyk. When the bough breaks: Managing extreme weather events affecting electrical power grids. *IEEE Power Energy Mag.*, 2014, 12(5): 61–65
- UCTE. Final report of the investigation committee on the 28 September 2003 blackout in Italy. 2004
- Anon. Report on the grid disturbance on 30th July 2012 and the grid disturbance on 31st July 2012. 2012. http://www.cercind.gov.in/2012/orders/Final_Report_Grid_Disturbance.pdf
- Federal Energy Regulatory Commission, North American Electric Reliability Corporation. Arizona-Southern California outages on September 8, 2011: Causes and recommendations. 2012. <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/04-27-2012-ferc-nerc-report.pdf>
- North American Electric Reliability Corporation. High-impact, low-frequency event risk to the North American bulk power system. 2010. <http://www.nerc.com/pa/CI/Resources/Documents/HILF%20Report.pdf>
- North American Electric Reliability Corporation. 2012 special reliability assessment interim report: Effects of geomagnetic disturbances on the bulk power system. 2012. <http://www.nerc.com/files/2012GMD.pdf>
- C. D. Wickens, J. G. Hollands, S. Banbury, R. Parasuraman. *Engineering Psychology and Human Performance*. 4th ed. New York: Psychology Press, 2013
- C. Ware. *Information Visualization: Perception for Design*. 3rd ed. Waltham: Morgan Kaufmann, 2013
- J. D. Weber, T. J. Overbye. Voltage contours for power system visualization. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2000, 15(1): 404–409
- R. Klump, W. Wu, G. Dooley. Displaying aggregate data, interrelated quantities, and data trends in electric power systems. In: *Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Waikaloa, HI, USA, 2003: 50
- R. Klump, R. E. Wilson, K. E. Martin. Visualizing real-time security threats using hybrid SCADA/PMU measurement displays. In: *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Poipu, HI, USA, 2005: 55c
- E. Tufte. *Beautiful Evidence*. Cheshire: Graphics Press, 2006
- T. J. Overbye, E. M. Rantanen, S. Judd. Electric power control center visualizations using geographic data views. In: *Proceedings of 2007 iREP Symposium: Bulk Power System Dynamics and Control—VII. Revitalizing Operational Reliability*. Charleston, SC, USA, 2007: 1–8
- S. Dutta, T. J. Overbye. Information processing and visualization of power system wide area time varying data. In: *Proceedings of 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications in Smart Grid*. Singapore, 2013: 6–12
- S. Dutta, T. J. Overbye. Feature extraction and visualization of power system transient stability results. *IEEE Trans. Power Syst.*, 2014, 29(2): 966–973