高可靠性要求的特大型城市轨道交通系统外电源安全管理

城市轨道交通用户是电力系统供电保障的重点，从城市轨道交通用户的供电方式和负荷特性入手，通过确立电力调度与地铁调度协同配合的思路，建立使用冲击负荷性质的*N*-1运行条件，利用信息化手段监视外电源负荷状况和外电源“评星”定级法评价地铁外电源的安全性等手段，实现了城市轨道交通外电源安全管理质量的提升，在治理城市轨道交通外电源存在的隐患同时，也为重要客户供电保障工作开创了新的模式。

李大志[1] 董楠[1] 郑广君[1] 苑画舫[1] 赵瑞[1] 宋方方[1] 王卫[1] 杨楠[2] /1.国网北京市电力公司电力调度控制中心 2.国网北京电力科学研究院

李大志/工程师

关键词/Keywords

轨道交通·
供电系统·
冲击负荷·
N-1运行条件·
安全管理·

0 引言

城市轨道交通负荷是北京城市供电运行保障最重要的负荷之一，北京地区的城市轨道交通采取10 kV供电的分散式供电结构，此种供电方式可避免了一座变电站全停造成轨道交通大面积停运的影响，但此种接线方式对外电源维护的要求也有所提高。

随着北京市交通压力增大，许多城市轨道交通线路发车间隔越来越短，有些线路甚至已经超过设计时的极限车密。其供电安全也越来越受到人们的关注。

本文从城市轨道交通用户的供电方式和负荷特性入手，通过确立电力调度与地铁调度协同配合的思路，建立使用冲击负荷性质的*N*-1运行条件，利用信息化手段监视外电源负荷状况，利用外电源“评星”定级法评价地铁外电源的安全性等手段，实现了城市轨道交通外电源安全管理质量的提升，在治理城市轨道交通外电源存在的隐患同时，也为重要客户供电保障工作开创了新的模式。

1 背景

1.1 保障首都城市安全运行的需要

北京是我国第一个建设城市轨道交通的城市，自1965年开通第一条地铁线路至今已有将近50年的时间。近年来，随着地铁网络的快速发展，城市轨道交通已成为城市发展和市民出行重要保障。截至2014年6月，北京城市轨道系统已拥有运营线路17条，总里程456 km，已开通车站222座，其中换乘站38座。2014年北京地铁日均开行机车6 334.5列，运送超过950万人次，单日最高客流量也已突破1 000万人次。其中10号线、1号线、2号线和4号线的日均客运量超过了100万人次，西直门等11座换乘站日均客流量超过了15万人次。具体情况如图1和图2所示。

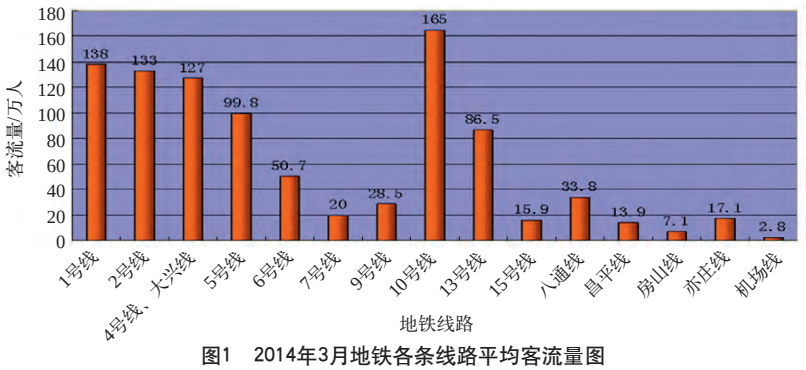

图1 2014年3月地铁各条线路平均客流量图

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

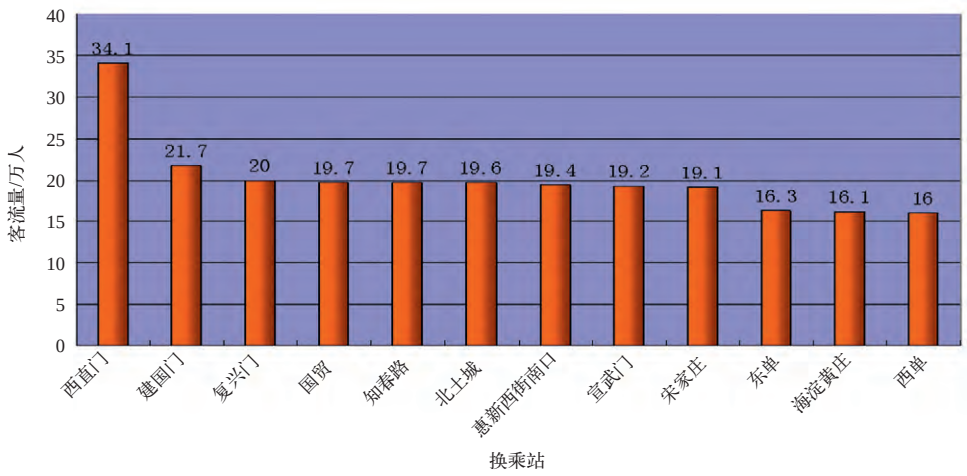

图2　2014年3月地铁主要换乘站平均客流量图

城市轨道交通快速发展在带来便利的同时，也带来了风险。城市轨道交通大部分运行区间处于地下，高峰时段人流极大，一旦发生紧急情况，极易出现混乱局面。因此，如何保障城市轨道交通的安全供电，就成了北京城市供电保障的重要课题。

1.2 适应城市轨道交通快速发展的需要

近年来，北京城市轨道交通发展极为迅速，2008年至今每年都有新的地铁线路投入运营。根据《北京市城市轨道交通近期建设规划调整（2007年~2016年）》，到2016年底北京地铁运营总里程将达到660 km以上，四环内轨道交通线网覆盖率将达到90%，居民步行30 min即可到达一座地铁站。

城市轨道交通的快速在给居民出行带来便利的同时，也给供电系统带来了不小的压力。目前，北京城市轨道交通系统的发车间隔一再缩短，对于部分早期投运的线路来说，已经超出了设计容量。轨道交通负荷的冲击性非常明显，越来越密集的车次带来了越来越大的冲击负荷，已经对供电安全造成了比较明显的影响。

城市轨道交通用户共有外电源261路。有大量外电源电缆线路不满足*N*-1运行条件，同时，部分继电保护装置在面对地铁冲击负荷时显得适应性不足。由于地铁冲击负荷性质，在地铁内部的装置和保护配置均为允许过负荷的配置模式，而公共电网往往不允许过负荷的发生，在正常运行情况下不会发生问题，但随着地铁车次的加密，在*N*-1故障情况下可能发生保护误动。

因此，如何适应北京市城市轨道交通的快速发展，如何建立保障城市轨道交通安全运行的常态化模式，也是北京城市供电保障的重要课题。

1.3 适应城市轨道交通负荷特性的需要

城市轨道交通用户负荷分为动力照明负荷与机车牵引负荷。动力照明负荷性质与普通用户负荷性质较为接近，而机车牵引负荷具有冲击负荷的特性。

以地铁2号线列车由车公庄出站到阜成门进站整个过程的牵引功率变化情况为分析对象，其列车最高时速约为80 km/h，运行时稳定速度一般在60~70 km/h之间，其额定牵引功率为2 160 kW，两站间距离约为1 km。地铁列车由出站到进站的过程一般分为起动、恒速和制动三个阶段。在起动阶段，机车电机由恒转矩阶段逐步进入恒功率阶段，当机车速度达到最大速度后，机车输出的牵引力基本上用于克服基本运行阻力，电机功率稳定在恒功率曲线上。在地铁机车启动阶段，由于加速度很大，功率上升很快，而达到最高速度后，又以较低的功率运行，其运行功率曲线如图3所示。

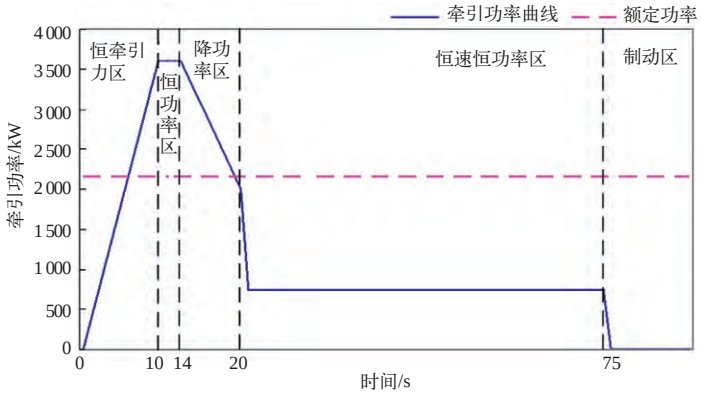

图3　地铁机车运行典型负荷曲线

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图3可知，列车运行时间共90 s，其中前10 s为恒牵引力区，牵引功率由0迅速上升至接近3 600 kW，约为其额定功率的1.65倍；之后进入恒功率区，牵引功率稳定在此数值约4 s；之后进入降功率区，约持续5~6 s，在此区段中机车仍处于加速状态，本区段结束后，机车达到运营最高速度，约70 km/h。之后的55 s内，机车处于恒速运行状态，牵引力与阻力基本平衡甚至略小，此区段内，机车速度处于基本恒定或缓慢下降状态。最后的约15 s时间为制动区，牵引功率为0，机车利用再生制动功能将动能转化为电能储存在蓄电池里。

冲击负荷的典型波形如图4所示，负荷波形的分辨率为5 s（即每隔5 s采样1次），为30 min内的冲击负荷波形。从图中可以看出冲击负荷的波形并无明显规律，仅为三角形锯齿波；另外冲击负荷峰值出现频率也无明显规律，10 min之内峰值一般出现4~7次，峰值出现的频率与地铁到站时间间隔和地铁车辆的投运数量有关。

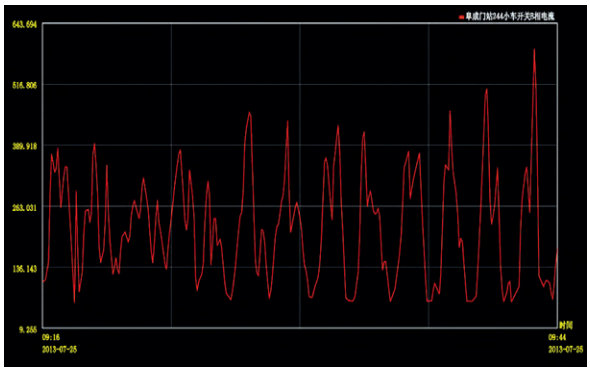

图4　30 min期间冲击负荷波形

城市轨道交通负荷为典型的冲击负荷，其基本性质与正常负荷差别很大，如果按照冲击负荷峰值来考虑设备选型，则难免造成大量的浪费，因此如何采取管理手段来适应城市轨道交通冲击负荷的性质，也是当前的重要课题之一。

2　内涵和主要做法

2.1　确立了电力调度与地铁调度协同配合的思路

从电气连接关系上看，北京电网与地铁内部电网通过两路10 kV直配电缆线路相连，不再串接转供其他客户，直接向地铁电源站供电，外电源线路产权归属用户，由用户负责运行维护。地铁电源站内部两路电源之间通过高压母联建立联络关系，正常运行时高压母联断开，各电源站之间通过电缆线路建立了联络关系。因此地铁内部电网的运行方式灵活多变，负荷转移能力较强，但是地铁负荷不正常的转移会造成外电源电缆线路过负荷运行，甚至是引起上级变电站开关过电流保护II段保护动作跳闸，对地铁正常运行产生严重影响。若电网设备发生故障会造成地铁负荷的闪动或部分停电，同样也会影响地铁运行。

为此，北京电力调度控制中心建立了北京地铁内部供电系统接线形式和运行方式的详细台账，要求相关调控运行人员熟练掌握。同时，北京电力调度控制中心与地铁调度之间建立了顺畅的信息沟通机制，两个调度联动应对内外部电网运行方式变化、设备故障和突发事件对地铁运行和电网安全的影响，并在以下几方面开展了相关工作。

（1）将全部地铁客户纳入调度户管理。在地铁外电源送电的同时，由各供电公司调度与客户签署调度协议，地铁内部方式调整、负荷转移和计划停电检修等均需向相应的调度管理单位申请。当电网发生故障或重大方式调整影响到所带地铁客户时，由相应电网调度及时通知地铁调度，告知风险情况、提示做好应急准备。

（2）以正式文件形式传递地铁外电源风险。北京公司针对地铁外电源开展了7个维度的运行风险评估，其中外电源是否满足*N*-1运行条件需要每日监视，其余常态化风险每月滚动评估。针对评估出的风险北京公司行函向地铁公司告知，并提示地铁公司开展老旧外电源电缆更换、不满足*N*-1线路提示供电能力改造、整治外电源运行环境等。

（3）当新建地铁线路用电报装或现有地铁客户增容、改造时，由北京公司发展部牵头制定接入系统方案，并组织营销、运检和调度等多部门共同研究探讨方案，充分考虑现状电网承载能力和规划电网与客户用电时序，确定最合理、最可靠的供电方式。同时在方案制定、工程实施的过程中不断跟客户进行沟通，从规划建设阶段将地铁客户运行风险降到最低。

2.2　确立了适应冲击负荷性质的*N*-1标准

为了适应城市轨道交通冲击性负荷的性质，北

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

京电力调度控制中心联合北京电科院共同研究确定了冲击负荷情况下新的*N*-1标准。考虑到电力电缆载流量主要取决于流过电缆电流的发热量，因此选择一段时间内冲击电流的有效值作为评判其外电源电缆线路是否过负荷的标准，要比直接利用瞬时电流值来考虑其是否过负荷更加科学。同时，还要考虑地铁冲击负荷在高峰时期不能大于公网线路的开关的保护定值，以防止冲击电流造成保护误动。因此，适应冲击负荷的*N*-1标准需要综合考虑冲击电流的峰值以及冲击电流的有效值。

冲击负荷条件下，电缆线路*N*-1判定条件标准如下：

（1）保护定值条件。双电源供电的轨道交通客户外电源*N*-1故障情况下，运行线路的冲击负荷电流不大于线路过电流II段保护定值。

（2）电缆线路过温条件。双电源供电的轨道交通客户外电源*N*-1故障情况下，运行线路的冲击电流有效值不大于电缆线路额定载流量。

根据相关定义和对比分析，冲击电流有效值可通过冲击电流5 s采样的数据结果进行近似模拟。可以选择先计算5 min时间段的采样平均值，然后再乘以系数1.16，可基本模拟冲击电流的有效值，同时可留有一定的裕度。利用上述方法可在自动化系统中较为简便的计算出轨道交通用户外电源冲击电流的有效值。

2.3 利用信息化手段监视外电源负荷状况

对于地铁客户负荷冲击性质明显、电流峰值高、持续时间短和*N*-1故障后易造成设备过载的特点，传统电网运行监视手段，如在变电站画面上监视出线开关电流值、设置限值报警等无法发现地铁运行过程中外电源存在过载风险。

针对此问题北京公司为每条地铁外电源线路定制开发了一套负荷监视系统，系统通过采集SCADA实时数据，以5 s为周期进行采样，以电流曲线的形式来展示每条外电源线路冲击负荷情况，并以电源站为单位，将两路外电源线路负荷进行叠加，展示若发生外电源*N*-1故障后电源站单电源时运行线路冲击负荷情况。系统通过计算每5 min内的电流平均值，展示地铁负荷有效值曲线。具体情况如图5所示。

同时在展示界面中设置了三个限值，分别为

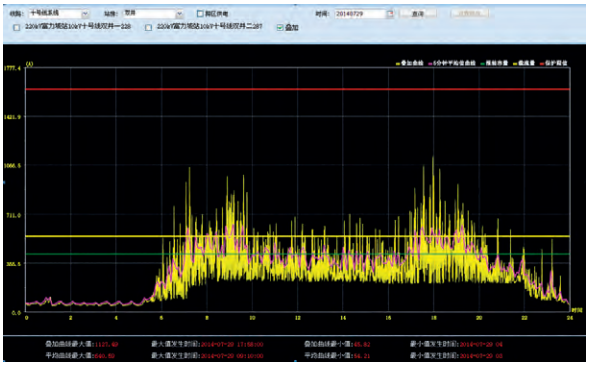

图5 地铁负荷有效值曲线监视图

地铁客户报装容量限值、外电源电缆线路载流量限值和上级变电站出线开关过电流II段保护定值限值。当有效值曲线超过电缆载流限值或冲击负荷曲线超过上级变电站出线开关过电流II段保护定值限值时，认定该电源站外电源线路不满足N-1运行条件。

此外系统还具备将相邻电源站负荷相加计算的功能，通过转供负荷冲击曲线、有效值曲线与三个限值对比，可以校验当本电源站两路外电源线路发生*N*-2故障后，相应负荷后相邻电源站带出是否满足运行要求，是否需要采取限负荷措施。具体情况如图6所示。

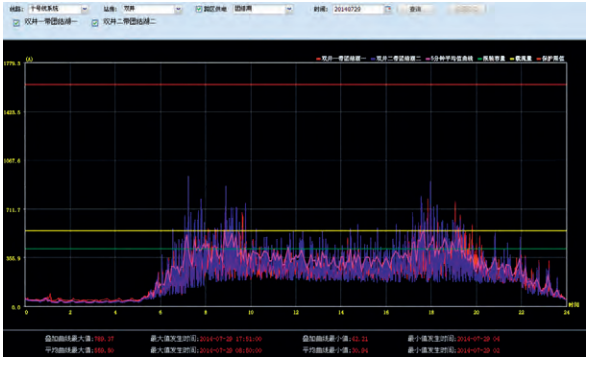

图6 地铁联络带路负荷曲线监视图

利用上述信息化系统，北京电力调度控制中心实现了对所有地铁10 kV外电源的集中监视，对其不满足*N*-1的情况做到了了如指掌，对其新出现的问题可以做到第一时间发现，第一时间处理。

2.4 利用外电源“评星”定级法评价地铁外电源的安全性

为了便于综合评价城市轨道交通客户外电源运行风险，在客户安全分析中引入了“风险指标”的概念，主要涵盖以下7个方面：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（1）电源结构。轨道交通客户应具备两路电源供电条件，当一路电源发生故障时，另一路电源能保证独立正常供电，供电电源可以来自不同变电站或同一个变电站的不同母线段。

（2）设备负载。高峰负荷期间，轨道交通客户多回直供线路中，若其中一回停运将导致其他电源线路或相关设备过载。

（3）电缆绝缘。轨道交通客户外电源电缆线路为油浸纸绝缘。

（4）敷设方式。轨道交通客户外电源电缆线路存在直埋区段。

（5）运行环境。主要包括电缆直埋路径被占压、两路及以上隧道内同侧支架或排管穿孔上下重叠，架空线交叉或跨越临近距离不够、存在线下隐患、弱电线违章搭挂及电杆被围圈等情况。

（6）运行年限。轨道交通客户外电源架空或电缆线路运行年限超过 20 年.

（7）保护配合。主要包括保护功能配置不全、无电压跳不配合、定值不配合和资料缺失等情况。

按照每个客户涉及风险的数量确定风险等级标准，对于单电源或同时存在三种及以上风险的轨道交通客户列为重点管理对象，在月度《重要客户外电源运行安全分析报告》中逐一分析，并从运行、技术和管理三个层面制定应对措施。轨道交通客户外电源梳理问题整改计划及落实情况应纳入各专业月度分析报告和年度方式报告。

3 实施效果

3.1 城市轨道交通外电源隐患得到治理

北京城市轨道交通共有运行客户113户，分属城区朝阳、海淀等11个属地公司管辖，电源点分布广泛，重要性高。在本项管理提升工作开展之前，电力调度与地铁调度的沟通机制尚不够顺畅，双方对于对方的运行情况以及存在的问题了解程度较浅，一旦出现紧急情况往往缺乏相互沟通的渠道。

2013~2015年，北京电力调度控制中心保护专业共完成了16路轨道交通外电源的过流保护定值调整，彻底解决了冲击电流可能造成的保护误动作的隐患。同时，各项外电源环境隐患治理工程也得以大量开展，城市轨道交通外电源运行安全水平得到大幅度提高。轨道交通客户未发生因外电源线路或其他公共电网设备故障而停运的情况。

3.2 为重要客户供电保障工作创建了新的模式

随着电力调度与地铁调度的沟通机制的建立，北京城市轨道交通系统与北京市电力调度系统的联系更加紧密。由于北京城市轨道交通的快速发展，新增报装客户逐年增多。北京市电力公司的发展部门、营销部门和调控部门协同配合、准确定位对北京城市轨道交通的接入方案、接入流程和联络机制都进行了规范化管理，确保新增地铁线路运行的安全、可靠。

2013年至今，北京共新发了四条地铁线路，共计17座地铁牵引站。新发地铁线路相关电源均已第一时间纳入北京市电力公司重点保障范围，实现了轨道交通供电保障零死角。

4 结束语

城市轨道交通用户是供电保障的重点，本文从城市轨道交通用户的供电方式和负荷特性入手，分析了城市轨道交通外电源的安全关键点，提出了城市轨道交通外电源的*N*-1判定标准，并以此为标准对实际系统进行了计算分析。结果表明，利用稳态电流有效值分析城市轨道交通外电源是否满足*N*-1运行条件，其结论与实际运行情况相符，并且能够反映城市轨道交通外电源安全状况。在此基础上本文对北京地区实际情况进行了分析，并得出指导实际运行的结论。

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

李大志（1983-），男，工程师，硕士研究生，主要研究方向为电力系统潮流计算、状态估计、暂态稳定分析计算等。

董楠（1981-），男，工程师，硕士研究生，主要研究方向为电力系统潮流计算、状态估计、暂态稳定分析计算等。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net