

北京地铁 10kV 及牵引供电能力评估

刘 斌¹ 闫思玲² 俞 屹² 张宇杰¹

1 中铁第五勘察设计院集团有限公司 北京 102600

2 北京市地铁运营有限公司供电分公司 北京 100000

【摘 要】北京市地铁网络中线路已超过 20 条，日客运量已超过 1000 万人次，是目前北京民众出行不可或缺的选择。为保障民众出行要求，提升运力、延长地铁运营时间已成为地铁运营公司的常态工作之一。而地铁运力不断提升、地铁运营时间的延长对地铁供电系统的可靠性与安全性提出了更高的要求。为了提升运营检修的效率，便于运营单位对工作的安排，北京市地铁运营有限公司拟在晚间非高峰时段采用大双边运行方式，对变电所进行常规的检修作业。本次供电评估工作对北京地铁线网直流牵引供电系统正常和非正常运行方式下的供电能力进行模拟计算以及对 10kV 环网及开闭所供电能力进行校核。

【关键词】地铁；10kV；牵引供电

1 牵引供电系统供电能力评估方法

1.1 供电评估流程

本次供电能力评估以地铁内部 10kV 供电系统和直流牵引（DC750V、DC1500V）供电系统为研究对象，围绕上述内容进行供电能力分析评估。本次评估采用牵引供电模拟软件，根据各线车辆资料、线路平纵断面资料以及运营组织资料对直流牵引供电系统进行模拟仿真，并对仿真结果进行分析。评估流程如图 1 所示。

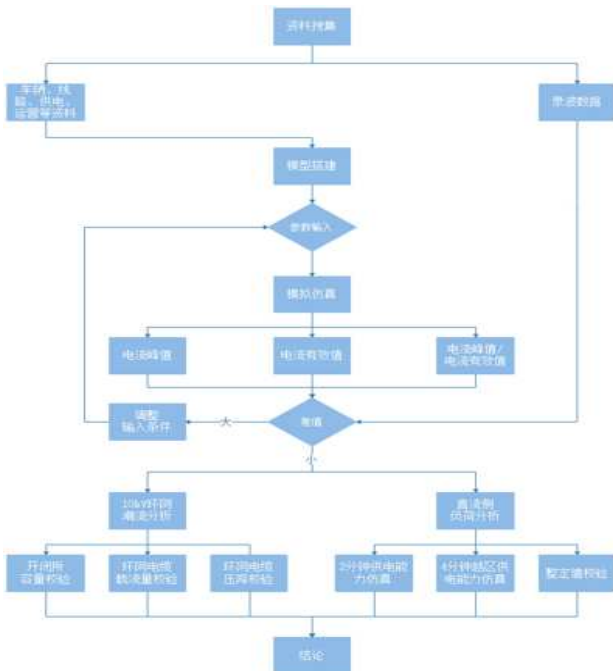


图 1 供电能力评估流程图

1.2 牵引供电仿真软件

本次直流牵引供电仿真软件采用了西南交通大学开发的 DCTPS 软件。

第一步，向仿真软件中输入车站和车辆段位置、线路平纵断面、车辆选型与列车编组、行车组织方案等资料。通过牵引计算模块获得站间运行时分、运行速度、平均速度等信息。

第二步，将牵引计算模块的输出数据作为输入，搭建每条线路的直流牵引供电系统电气参数模型，开展直流牵引供电计算，得出各个牵引所的输出功率、输出电流等电气参数，并输出数据报表。

列车运行仿真计算过程如图 2 所示。

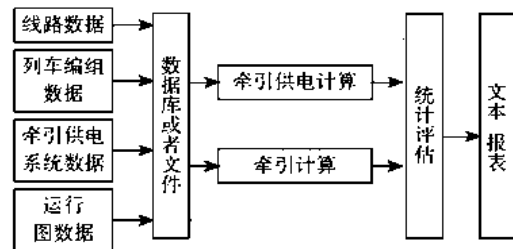


图 2 列车运行仿真计算过程图

1.3 直流牵引供电计算的工况分析

在进行牵引供电系统设计时，通常会考虑正常供电工况，针对故障运行方式，则只考虑全线考虑任意一座牵引变电所解列，采用大双边供电的工况。

而本次供电能力评估将考虑更为严苛的故障工况，即在非高峰时段人为退出一座牵引变电所时，若其相邻牵引变电所再发生故障的工况。该工况为双重故障，在系统设计时并未考虑，但为了使运营单位可以更好的开展应急预案编制，掌握牵引供电系统的能力极限，本次评估针对以上工况能满足几分钟发车间隔进行了核算。

因此本次供电能力评估将对以下工况进行牵引供电系统模拟仿真：

- (1) 正常运行方式，全线各牵引所均正常运行；

(2) 全线考虑任意一座牵引变电所解列, 采用大双边工况运行;

(3) 全线考虑任意一座牵引变电所解列在非高峰时段退出运行进行检修作业, 采用大双边工况运行时, 再发生相邻牵引变电所故障退出的工况, 针对工况(3)又区分为两种细分工况:

- a. 当正线中一座牵引变电所解列时, 对于线路中间牵引变电所, 由相邻的正线牵引变电所越区大双边供电;
- b. 对于线路端头牵引变电所, 由相邻的正线牵引变电所越区单边供电。

2 直流牵引供电能力及 10kV 能力校核

2.1 直流侧牵引供电能力分析

利用上述的仿真计算方法, 分析以下几种工况的供电能力。

(1) 按照远期高峰小时 2 分钟发车间隔, 在正常双边和大双边工况下, 通过仿真得出直流进线断路器和馈线断路器的最大电流值。经校核, 进线断路器和馈线断路器的最大电流值均未达到过流的保护定值。因此可以验证单个牵引变电所退出, 进行设备检修, 供电系统采用大双边运行方式的方案是可行的。

以北京地铁某线为例, 进、馈线断路器最大电流如表 1 所示, 并与整定值进行比较。可见正常双边工况和大双边工况的直流进线和馈线断路器电流仿真值的最大值都远小于保护定值。

表 1 北京地铁某线 2 分钟发车间隔进线、馈线断路器电流与定值对比表

定值校验类型	定值	正常双边工况 仿真最大值	大双边工况 仿真最大值
进线速断保护 (A)	12000	6401	8630
馈线速断保护 (A)	9000	6318	8564

(2) 核算最低牵引网压, 标称值为 750V 时, 直流牵引系统的最低牵引网压为 500V; 标称值为 1500V 时, 直流牵引系统的最低牵引网压为 1000V, 北京地铁某标称值为 1500V 的线路的最低牵引网压数据如表 2 所示, 此时牵引网压不满足规范的要求, 提出建议不满足网压要求的车站不要提前停电检修的建议。

表 2 北京地铁某线最低牵引网压

规范最低牵引网压 (V)	4 分钟发车间隔下最低牵引网压 (V)	
	越区大双边工况	末端越区单边工况
1000	1235	853

当末端牵引所或其相邻牵引所提前停电检修, 则可能发生越区单边供电工况, 即末端 2 座牵引变电所同时退出, 由倒数

第 3 座牵引所支援供电至线路末端的工况, 经核算, 该工况牵引网最低电压不满足规范要求, 因此不建议采用末端越区单边供电的方式进行供电。

(3) 非高峰时段 (按照 4 分钟间隔考虑), 在采用大双边工况对退出牵引变电所进行检修时, 再发生相邻牵引变电所故障退出的越区大双边工况下, 通过仿真得出直流进线断路器和馈线断路器的最大电流值。经校核, 进线断路器的最大电流的计算值均小于对应断路器的保护整定值, 但多条线路此时的牵引负荷较重, 出现馈线断路器最大电流接近保护定值的现象。

以北京地铁某线为例, 越区大双边和末端越区单边的工况下, 最大馈线电流达到了 9314A, 在该工况下若实际运行图与仿真运行图出现差异, 则馈线断路器跳闸发生的概率就较高, 如表 3 所示。

因此, 本次评估根据计算结果, 对每条线路各个牵引所提前停电检修工况进行核算, 并对直流馈线断路器最大电流设定了 1.2 的可靠系数, 即当越区大双边工况下, 之比小于 1.2, 则不建议该牵引所采用提前停电检修的方式。

表 3 北京地铁某线 4 分钟发车间下馈线断路器保护整定分析

名称	开关柜名	整定电流 (A)	4 分钟发车间隔下馈线断路器最大电流 (A)
			越区大双边和末端越区单边工况
正线牵混所	馈线柜	10000	9314

2.2 10kV 能力校核

按 2 分钟发车间隔考虑, 搭建 10kV 环网电缆潮流计算模型, 将与现场实际数据校核过的直流牵引数据作为输入数据。其中, 配电变压器的实际负荷是从 PSCADA 中获取的而非采用安装容量 * 负荷率计算得出。最终计算得出正常工况、相邻开闭所一回电源故障 (N-1 工况) 和相邻开闭所两回电源故障 (N-2 工况) 情况下的开闭所容量、进线电缆电流、环网电缆电流以及环网电缆压降等参数, 并与整定值进行比较。以北京地铁的其中一条线的数据为例, 其交流部分汇总表如表 4 所示。

表 4 北京地铁某线路交流部分汇总表

项目	仿真工况			各项目的允许值
	正常工况	N-1 工况	N-2 工况	
各开闭所负荷最大值 (kVA)	4224	6628	6407	10000
各开闭所进线电缆电流最大值 (A)	244	383	370	550
中压环网电缆电流最大值 (A)	120	155	251	480
环网电缆压降最大值 (%)	4.72%			5%

根据上表可看出, 10kV 牵引供电系统满足 2 分钟发车间隔的供电负荷需求。

3 模拟仿真结果验证

为了得到高可靠度的仿真模拟计算结果, 本次评估将运营单位提供的现场实际录波数据用录波软件进行分析, 计算出现场实际馈线电流的最大值和有效值, 再将仿真软件输出的模拟计算结果与现场的录波数据进行对比, 可以看出模拟仿真数据与现场实测数据之间的关系。

通过以上对比分析, 调整直流牵引模拟仿真的相关参数, 得出与实际运营数据更匹配的系统参数, 然后利用此参数重新开展模拟仿真, 从而使仿真数据更有说服力。

3.1 录波数据的梳理与仿真数据的计算

本次录波数据采用的是北京地铁公司提供的从各条线路中挑选出的典型站的工作日早、晚高峰的数据。因此采用工作日早晚高峰的峰值电流数据进行对比, 得出结果的可靠性较高。与此同时, 为了更好的反映出录波数据对设备的影响, 也计算出相对应工作日早晚高峰的有效值电流。

将仿真得出的馈线断路器流经电流的峰值和有效值与录波数据得出的峰值和有效值进行对比。由于列车在运行过程中取流受一些不确定性因素的影响, 为了得到与现场录波数据更为接近的数据, 在发现仿真计算结果与现场的录波数据存在一定的差异时, 调节列车的停站时间从而改变区间同时取流列车数, 甚至调节列车的牵引力系数, 然后再次进行仿真计算, 从而找到某些被忽略的极值电流点, 不断进行仿真直至得到与录波数据的趋势相匹配的数据。此时, 为了说明计算结果的可靠性, 仿真数据应大部分大于实际录波数据。

3.2 数据分析

以北京地铁某条线为例, 将模拟仿真计算出的峰值电流和有效值电流与现场录波数据进行比较。对比图如图 3、图 4 所示。

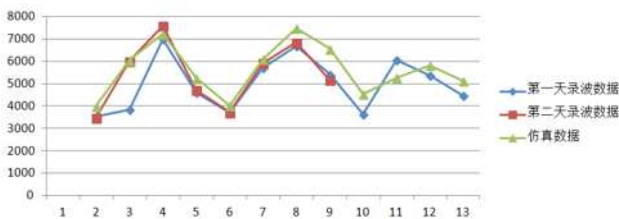


图 3 馈线断路器峰值电流对比图

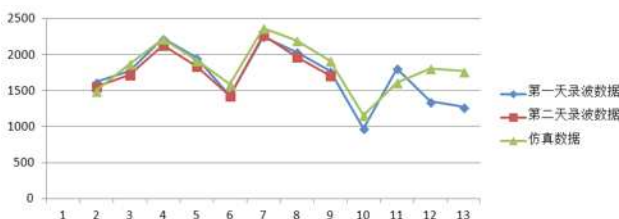


图 4 馈线断路器有效值电流对比图

在此定义误差为录波数据 / 仿真数据 * 100%, 即误差大于 100% 的表示录波值大于仿真值, 误差小于 100% 的表示录波值小于仿真值。仿真与录波数据的误差如图 5 与图 6 所示。

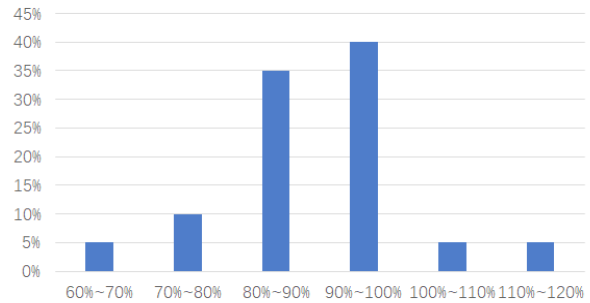


图 5 馈线断路器峰值电流误差分布

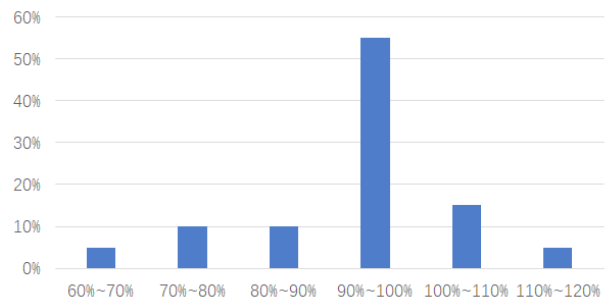


图 6 馈线断路器有效值电流误差分布

由以上图表中的数据可以看出有 80% 以上的仿真数据大于录波数据, 仿真数据与录波数据的趋势基本一致, 且误差基本符合正态分布的规律, 都集中于 80%~100% 这个区间, 证明仿真出的数据能较好的说明现场情况, 采用上述仿真数据来判断负荷情况、验证保护定值、校验设备容量从而进行分析的方法是可行的。

4 结论

本文从供电系统直流侧牵引能力和 10kV 能力两个方面对北京 5、6、7、9、10、13、15 号线以及房山线等共计 14 条已运营线路进行了供电评估, 得出以下结论:

(1) 以上各条线路的 10kV 供电能力均满足远期高峰小时 2 分钟发车间隔负荷需求;

(2) 经过仿真与现场实际录波数据匹配性分析, 验证了本文所选用的模拟仿真软件及评估方法具有较高的准确性与实用性;

(3) 结合北京地铁运营公司的实际需求, 研究了非高峰时段 4 分钟发车间隔下对牵引变电所采用提前停电检修的技术可行性, 并针对每条线路明确了可提前停电检修的车站和不建议提前停电检修车站的范围。

本评估完成的 10kV 供电能力校核及牵引供电能力评估, 使地铁公司更好的掌握各线路供电系统的供电能力, 为北京市地铁运营公司在提升运力、开展提前停电检修等方面的决策提供了理论依据和数据支持, 收到了良好效果。

【参考文献】

- [1] 李群湛. 城市轨道交通交流牵引供电系统及其关键技术 [J]. 西南交通大学学报, 2015, (2) :199-207.
- [2] 李辉, 徐炯, 彭道刚. 城市轨道交通牵引供电系统动态运行仿真研究 [J]. 电测与仪表, 2016, (11) :104-109.