北京市轨道交通中压电压等级的选择

中压网络是城市轨道交通供电系统中的重要组成部分，经济合理地选择中压网络，有利于优化系统供电方案，减少工程投资，便于运营管理维护。近年来随着轨道交通的迅速发展，列车编组从6B发展到8B、8A，相对应列车负荷增大，由于客流量的增大，北京部分轨道交通线路的实际发车间隔已达到甚至小于2 min的系统设计能力，这对轨道交通的供电系统提出了更高的要求。本文通过对北京地铁6号线外电源承载能力仿真及实测的校验，从负荷情况、谐波、造价等方面对比分析35 kV和10 kV电压等级哪种更适合北京轨道交通的发展。

张羽舒 刘昊羽 马雪峰 张杰超/ 北京电力经济技术研究院

张羽舒/工程师

关键词/Keywords
轨道交通·
供电系统·
中压网络·

北京是我国第一座开始建设城市轨道交通的城市。截止到2013年6月，北京城市轨道交通系统已经拥有运营线路17条，包括16条地铁线路和1条机场快轨，总里程456 km，开通车站222座，单日最高客流量突破1 000万人次，为北京市民的出行作出了巨大贡献。同时，北京市仍然有多条地铁线路正在建设或者规划之中，在不久的将来，城市轨道交通线路必将布满整个北京交通系统，大大方便了城市运作和居民生活。

近年来随着轨道交通的迅速发展，列车编组从6B（车辆采用6节B型车厢）发展到8B（车辆采用8节B型车厢）、8A（车辆采用8节A型车厢）。6B车辆定员为1 460人，系统最大运能为每小时4.38万人；8B车辆定员为1 960人，系统最大运能为每小时5.88万人；8A车辆定员为2 480人，系统最大运能为每小时7.44万人。A型车厢比B型车厢长3.1 m，高0.2 m。相应8A列车负荷较6B、8B列车增大很多，这对轨道交通供电系统提出了更加苛刻的要求。本文通过对北京城市轨道6号线供电系统进行调研分析，对当前6号线供电系统结构进行梳理、总结，从负荷情况、保护、谐波和造价等方面对比分析35 kV和10 kV电压等级哪种更适合北京轨道交通的发展。

1 轨道交通中压网络供电系统

国内现有地铁的中压供电网络有35 kV、33 kV以及10 kV电压等级。其中33 kV电压等级，我国电力系统并未推荐，广州等地由于特殊历史原因采用了该电压等级，但在其他地区很少使用。不同电压等级的中压供电网络有着不同的特点：

1）35 kV。输电距离远、输送容量大、电能损失小、设备体积相较大及价格高。

2）10 kV。输电距离近、输送容量小、电能损失大、设备可国产化、设备体积小、价格低及城市配电网大量使用。

对于35 kV和10 kV电压等级供电，目前国内外的供电方式包括如下三种：

1）集中供电方式。沿地铁线路根据用电负荷情况和地铁线站间距离，建设地铁专用主变电所（通常由城市电网提供两路电源），降压为地铁供电系统所需电压等级35 kV或10 kV。再由主变电所集中对地铁的牵引变电所和降压变电所进行供电。国内采用该供电方式的有广州、深圳、上海和香港地铁。

2）分散供电方式。根据地铁供电系统需要，沿地铁线路直接接入城市电网的多路区域开闭所，再由区域开闭所直

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接对本所和相邻变电所的牵引变电所和降压变电所进行供电。分散式供电方式中沿线开闭所的数量较多，多为10 kV 电压等级。

3）混合供电方式。集中供电方式与分散供电方式相结合，部分线路采用集中供电，部分线路接入城市电网电源，例如武汉轨道交通、北京地铁1号线。

表1总结了国内轨道交通主要线路的供电方式。

表1 轨道交通主要线路供电方式

地区	一般用户变电站电压等级	地铁变电站电压等级	线路	列车编组	供电方式
北京	10 kV	10 kV	已运营及在建线路	6B为主	10 kV开闭所供电方式
上海	10 kV和35 kV	35 kV	一、二号线	8A	110/35 kV供电方式
			其他线路	6A为主	110/35 kV供电方式
天津	10 kV和35 kV	10 kV和35 kV	投运线路	6B/4B	35/10 kV供电方式和110/35 kV
			在建线路	6B	110/35 kV供电方式
广州	10 kV	33 kV	所有线路	6A为主	110/33 kV供电方式
重庆	10 kV	10 kV和35 kV	投运线路	独轨4节编组	110/10 kV供电方式
			在建线路	独轨/6B	110/35kV供电方式
南京	10 kV	35 kV	所有线路	6A	110/35 kV供电方式
深圳	10 kV	35 kV	所有线路	6A为主	110/35 kV供电方式
苏州	10 kV和20 kV	35 kV	所有线路	4B/6B	110/35 kV供电方式

从国内外建设和发展情况来看，地铁供电系统选择何种供电方式，主要应考虑供电系统的可靠性、安全性、经济性和供电质量等因素，不同轨道交通线路可以根据工程特点、城市电网规划及电网资源情况综合考虑。

2 6号线供电方案

北京地铁6号线是一条贯穿中心城东西方向轨道交通线。已开通运营线路长30.750 km，车站20座，停车场及车辆段各1座。车辆采用我国标准B型车，采用8辆编组方案，列车最高运行速度100 km/h。现状其外电源方案如图1所示。

以10 kV对地铁线路供电时，采用的一般方法是每隔一座车站，由一座公共变电站提供两路电源，个别车站距离较近时，可以相隔两个车站（此时会有一座车站不提供牵引电源）。

变电站对地铁供电采用电缆线路，6号线采用截面积300 mm^2的铜芯电缆（最大载流量为550 A）。地铁内部采用双环网，将所有车站连接，每座车站的配电室安装牵引变压器及正常负荷变压器。有外电源的车站向一座相邻车站正常供电，并向另一座车站提供备用电源。

6号线为2012年底开通运行的地铁线路，据统计，2014年高峰时间发车间隔约为3 min，节假日发车间隔约为2.5 min.

地铁的负荷为车站动力照明与机车牵引负荷的叠加。其中，牵引负荷主要为列车用电，其用电量取决于行车密度、车型、列车编组及载客量等因素。负荷变化很大，很难观测变化情况；动力照明负荷主要取决于线路和车站建筑规模，一般为一个平稳值，变化小且慢。根据实际运行数据，2013年6号线各总配单回外电源线路的最大负荷如表2所示。

表2 2013年6号线外电源线路负荷

总配名称	单回外电源线路负荷 / kV·A
五路居停车场	3 551
白石桥南	7 863
车公庄	3 135
北海北	6 391
东四	4 728
东大桥	4 243
金台路	4 088
青年路	3 741
黄渠	5 248
五里桥车辆段	4 746

注：现状五路居停车场区间由于外电源尚未正式送电，目前由白石桥南区间带出，所以负荷较重。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 北新桥站实测分析

为进一步掌握地铁运行的负荷情况，对其实际负荷进行了跟踪测量。测量的地点为公共变电站的地铁双回路电源开关，测量其三相电流。将每个周波的电流有效值测量结果暂存，每分钟做50个周波的平均值计算，形成一个记录，连续记录一周，然后分析数据。为找到最大负荷，选择的时间为7～8月。

3.1 最大负荷

由于负荷波动很大，确定以整点一小时平均值寻找最大负荷。经比较，周五17：00～18：00时和18：00～19：00时负荷最大。然后按10 min间隔从17：00开始推移比较，结论为17：00～18：30期间出现最大负荷，数值为238.02 A。发车间隔为3 min。图1是东四车站周五17：30～18：30负荷电流直方图。

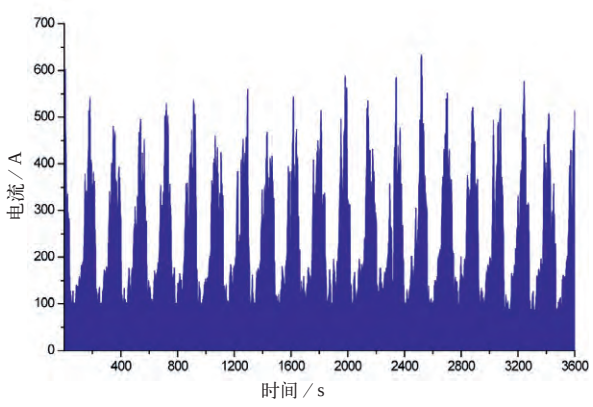

图1 东四车站8月9日17：30～16：30负荷电流直方图

经分析，周五晚高峰人员集中出行度高，气候炎热虽不及下午14：00～15：00时，但气温仍然很高。此时站内空调负荷及滚梯负荷大增，地铁列车处于重载或超员，负荷最高。

3.2 最大负荷电流损耗与恒定电流在线路及元器件损耗的差值

波动的电流与恒定电流在线路及元器件的损耗是不一致的。对于短时变化较大的电流（时间不超过15 min，变化幅度超过最大值的30%）应按均方根方法核算元器件的载流能力。将最大负荷1 h电流每秒值平方后相加，然后除以3 600，再开平方。得出的数值为268.27 A，该数值为恒定电流的238.02 A的热效应电流。比恒定电流的238.02 A高出约12.7%。地铁所有元器件的载流能力均应按此方法核算。目前我们的最小载流元件是电缆，核算时主要对电缆载流进行比对。

3.3 外电源故障时电流核算

1）事故一：双电源一路发生事故退出运行。两路电源相加后最大1 h平均电流为268.27 A，核算相当于238.02 A电流的发热，该数值远小于外电源电缆载流能力550 A。一路电源可以保证长期供电，不会影响地铁运行。

2）事故二：本车站一相邻有外电源车站双路外电源全停。由于所有车站内部为双环网连接，并有自动投入装置，最恶劣的情况时全部自动投入至本站。此时本站的两路电缆会带出4座车站负荷。由于负荷会比较平均地分配在本站两路外电源上，本站两路外电源最大1 h平均电流均应达到268.27 A，核算相当于238.02 A电流的发热，该数值远小于外电源电缆载流能力550 A。一路电源可以保证长期供电，不会影响地铁运行。

3）事故三：本车站两相邻有外电源车站双路外电源全停。通过双环网的连接，最恶劣的情况时两相邻有外电源车站全部自动投入或人工切换至本站。此时本站的两路电缆会带出六座车站负荷。由于负荷会比较平均地分配在本站两路外电源上，本站两路外电源最大1 h平均电流均应达到357.03 A，为本站单路故障时另一路电流的150%，核算相当于402.4 A电流的发热，该数值仍远小于外电源电缆载流能力550 A。一路电源可以保证长期供电，不会影响地铁运行。而此时35 kV供电系统无法应对。

4）事故四：本车站一侧两相邻有外电源车站双路外电源全停。通常情况时，与本车站相近的一座车站及对其正常供电的相邻车站负荷均由本站带出，其他停电车站由另外的车站带出，最恶劣的情况（两相邻有外电源车站全部负荷均由本站带出）会使本站双路电源负荷达到原来的3倍，但由于两路电源负荷会比较均匀，不会出现过负荷现象。

3.4 车站动力照明负荷和机车行车牵引负荷的典型值

机车靠站停车时认为没有耗电，机车的照明、通风和空调器负荷远小于机车行车时的负荷（约为机车行车负荷的1%～2%），并统计在车站负荷内。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

机车行车负荷的典型值是在机车重载或超员时段，选取多个（10个）认为波形较好的曲线平均而成。机车行车牵引负荷典型曲线值如图3所示。

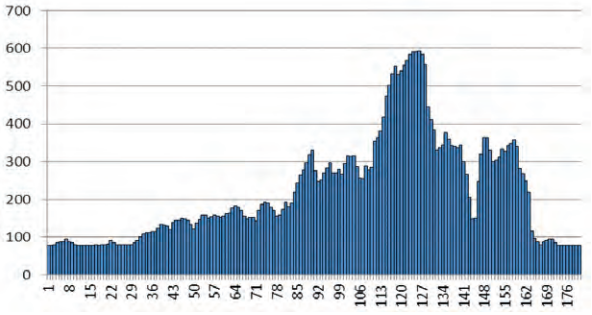

图3 机车行车牵引负荷典型曲线

机车靠站停车时的负荷为车站负荷。最大车站负荷即选为周五晚高峰时没有机车运行的负荷值，该电流在1 h内没有任何变化，为100 A。但各个整点的车站负荷并不一致，呈现与气温、人员的一定关系。

将20个机车牵引负荷典型曲线与车站动力照明负荷平均分布相加，形成新的曲线。计算其平均负荷电流及热效应电流，结果几乎完全一致。

3.5 车次加密后负荷预测

观察每小时车次的变化时，发现周末的高峰时间车次明显增加，最多到达每小时24次，但由于其他原因，1 h平均电流并不高，在车站负荷上将平均分布的车次在原有每小时20次逐步增加，计算其平均电流及折合热效应电流。计算结果如表3所示。

表3 车次加密后电流及热效应电流值

车次／h	20	22	24	26	27	28	29	30
电流／A	220.57	227.64	234.46	241.23	248.13	255.42	262.10	268.44
热效应电流／A	260.09	265.92	271.56	277.05	282.49	287.94	293.10	298.07

此外还计算在上述4种外电源事故时，不同车次时的平均电流及折合热效应电流。计算结果如表4所示。

表4 车次加密后四种外电源事故电流值

	车次／h	20	22	24	26	28	29	30
事故一	电流／A	361.46	375.5	389.11	402.60	416.36	430.87	444.21
	热效应电流／A	454.38	465.25	475.79	486.08	496.2	506.26	515.92
事故二	电流／A	361.46	375.5	389.11	402.60	416.36	430.87	444.21
	热效应电流／A	454.38	465.25	475.79	486.08	496.20	506.26	515.92
事故三	电流／A	401.46	415.5	429.11	442.60	456.36	470.87	484.21
	热效应电流／A	486.80	498.09	509.0	519.69	530.21	540.72	550.74
事故四	电流／A	401.46	415.50	429.11	442.60	456.36	470.87	484.21
	热效应电流／A	486.80	498.09	509.02	519.69	530.21	540.72	550.74

由此可见，在上述4种事故情况下，地铁由10 kV供电时，至多会有1~2座车站短时全部停电，靠刀开关操作供电，对整个地铁系统的影响很小。当地铁由35 kV供电时，一般至多有3座专用变电站提供电源，每座专用变电站提供两路35 kV电源。一座变电站在地铁线路中部注入35 kV电源，另两座专用变电站由两端注入35 kV电源。任一上级专用变电站全停时，均有数座车站短时全部停电，靠刀开关操作供电。虽然停电的时间仅为数分钟，但停电车站过多，事故影响较大。

3.6 保护装置误动作跳闸

地铁运行后，曾经出现保护装置误动作跳闸现象，误动作的保护为过电流保护。为此进行了

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数据分析。

对最大平均负荷电流最大的1 h数据进行分析，其结果如表5所示。电流平均值、最大值和最小值直方图如图4所示。

表5　最大负荷一小时电流分析

电流值 / A	0～100	101～200	201～300	301～400	401～500	501～600	601～700
个数	107	1763	560	713	344	108	5
百分比（%）	2.97	48.97	15.56	19.81	9.56	3.00	0.14
最大值				631.5 A			

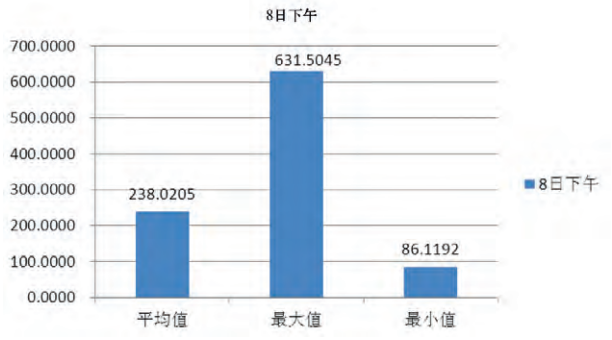

图4　最大负荷1 h电流平均值、最大值和最小值直方图

经过分析可以看出虽然平均电流很小，但1 s内平均电流大于500 A的次数高达100次以上。若出现异常运行方式，电流超过电过流保护定值（1 200 A）的几率会很高。

解决的方法是在保证过电流保护灵敏度的情况下尽量提高保护定值，但要确保该定值小于最小运行方式地铁配电室10 kV母线两相短路的电流的一半。此时其过电流保护定值可能高于速断保护定值，应继续修改速断保护定值，确定为最小运行方式10 kV三相短路变电站母线电压降至60%额定电压的电流。此电流会远远大于地铁配电室10 kV母线三相短路的电流。

4　造价比较

地铁采用10 kV供电时，需要每隔一座车站从一座变电站接入两路10 kV专用线路。线路均应采用电缆，且路径应为隧道或管井，路径长度一般为2 km。敷设双路YJY－3×300 mm^{2}电缆。变电站的间隔造价可以按一座110 kV变电站（或一个110 kV新建输变电工程）的综合造价除以馈线间隔数计算。

地铁采用35 kV供电时，由于没有合适的110 kV及以上变电站为其提供电源，地铁工程须自建至少3座110 kV的专用变电站，使其电源的可靠性不会远低于10 kV供电的可靠性。每座专用110 kV变电站应对应某一座220 kV变电站的两个110 kV间隔，占用不少于5 km的电缆隧道（按内部2×2.1 m隧道造价0.1～0.15倍造价计算）。

对比35 kV方案和10 kV方案建设投资，每座站直流侧设备基本一致，交流侧网架电缆、环网柜及二次设备数量和容量基本一致，但由于电压等级差别，导致35 kV方案中各类型设备电压等级升高，相对应的设备投资和建设成本也较高。表6给出部分主要设备的平均价格作为参考。

表6　部分主要设备平均价格

10 kV			35 kV		
设备名	型号	价格	设备名	型号	价格
10 kV电缆	YJV8.7/103×300	70～80万元/km	35 kV电缆	YJV26/35 3×300	80～90万元/km
10 kV配电变压器	315 kV·A	2.5万元/台	35 kV配电变压器	315 kV·A	3.8万元/台
	1 MV·A	7万元/台		1 MV·A	13万元/台
	1.6 MV·A	12万元/台		1.6 MV·A	23万元/台
10 kV真空断路器	台	2.5万元/台	35 kV真空断路器	台	4万元/台
10 kV环网柜	单元	7.5万元/单元	35 kV环网柜	单元	10万元/单元
10 kV开闭所	座	200万/座	110 kV变电站	个	0.05万元/kV·A
管井	米	600万元/m	2.0×2.1隧道	米	1 500万元/m

总体来看，在外电源建设与内部供电主网架上（不含直流侧等两方案相同部分），35 kV方案

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

建设投资费用投资较高，至少比10 kV方案高出30%～40%左右。

5 谐波治理

地铁的机车采用直流供电，整流设备产生大量谐波电流（电气污染）。

地铁由10 kV供电时，由于地铁内部空间狭小，很难提供安装治理谐波（污染）的设备。这些谐波（污染）分散排放至电力企业的各个变电站。电力企业将地铁谐波（污染）和其他用户产生的谐波（污染）共同治理。治理费用由电力企业承担。

地铁由35 kV供电时，地铁产生的大量谐波（污染）集中传至专用变电站，专用变电站必须安装治理谐波（污染）的设备。这时，治理费用由地铁方面业承担。

本文选取一周的高峰小时（8月8日17:30～18:30）中电流的50个周波数据进行谐波分析，得出3、5、7次谐波含量及总THD畸变率如表7所示。

表7 高峰小时1 s电流谐波分析

谐波次数	3	5	7	THD
含量（%）	1.18	9.49	4.44	10.56

采用10 kV中压电压等级供电地铁供电系统的谐波可以满足GB/T 14549－1993《电能质量公用电网谐波》对10 kV电压等级同此谐波电流规定的允许值要求。

6 结束语

10 kV及35 kV外电源引入均是合理可行的，两种方案在设备及建设方面，相关设备与技术方案在国内外有广泛的应用场合，完全成熟，均不存在技术性风险。但从综合适用性方面，经对比分析如下：

1）采用10 kV供电，具有管理幅度小，工程建设协调容易等优势；35 kV外电源方案实施难度大，因为需要新建110 kV变电站，存在无法满足工期要求的风险。

2）采用10 kV供电，可以满足机车负荷要求，并且车次加密到2 min时也符合要求，不会引起外电源线路过载。

3）北京电网电压等级为220 kV、110 kV和10 kV，只有少数偏远的郊区还存在一些35 kV网络，这些35 kV网络较为薄弱，供电能力不足（相对庞大的地铁负荷），可靠性及抗风险的能力很差。北京电网220 kV、110 kV变电站大都有两个不同方向的电源。由于城市负荷密度很高，变电站的间隔只有2 km左右，不但可以满足地铁电源的数量要求，还能满足电源的多方向，使地铁电源的可靠性及抗风险能力非常高。

4）10 kV供电方案比35 kV供电方案投资费用少，并且设备充足，应用广泛，运维管理经验丰富，35 kV逐步弱化，备品缺乏，运维管理存在一定难度。

论证表明，针对6号线列车组负荷特点，并考虑地铁内部供电网络的发展趋势、地铁与普通用户的区别性和地铁供电的独立性，从外电源负荷能力校验、可靠性、造价比较及谐波比较等各方面的因素出发，北京轨道交通系统适宜采用10 kV供电模式。

参考文献

[1] 张海波. 城市轨道交通供电系统中压网络的选择[J]. 城市轨道交通研究，2005(5)：55.

[2] 陆海军. 地铁供电系统的供电方式及其选择[J]. 现在城市轨道交通，2005(4)：36.

[3] 张永康. 地铁供电系统外部电源供电方式的分析与研究[J]. 城市轨道交通研究，2005(3)：21.

[4] 何宗华. 城市轨道交通设计指南[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1993.

[5] 于松伟. 城市轨道交通供电系统的中压网络研究[M]. 北京：兵器工业出版社，2002.

（收稿日期：2015－05－26）EA

作者简介

张羽舒（1985-），工程师，博士，从事电网规划、设计工作。

刘昊羽（1984-），工程师，硕士，从事电网规划、设计工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net