地铁接触网方式牵引供电系统开关设置探讨

文/中铁华铁工程设计集团有限公司　史志成

目前采用接触网方式的地铁牵引供电系统一般由交流35 kV变为低电压后整流为1 500 V直流电供地铁列车使用，按照通常思路在高压侧、直流侧的每一回路均设置了断路器，但地铁系统具有如下特点。

1）直流回路只有地铁列车一种负载，不同于一般供电线路有各种各样不同的负载。

2）地铁列车在晚上收车后，负载为“0”，不像普通供电线路每天有峰有谷，谷时仍有负载。

3）地铁接触网某一段停电检修时，同方向会停运，相邻段接触网带电无意义。

综上所述，在开关设置时不应像一般电线路（如一座工厂）那样去考虑。

采用接触网方式的地铁牵引供电线路

地铁分成若干个供电分区，由2个以上主变电所把110 kV电压变为35 kV后，沿左、右线隧道分2路用电缆敷设至各供电分区变电所，经高压断路器至牵引变压器，变为低电压后经整流装置变为1 500 V直流电，再经由直流断路器配出至接触网。每个牵引变电所馈出4路电缆，每路设一个直流开关柜。图1为一个牵引变电所的供电示意图。

正常运行时，每座牵引变电所的2台整流装置并列运行，向正线

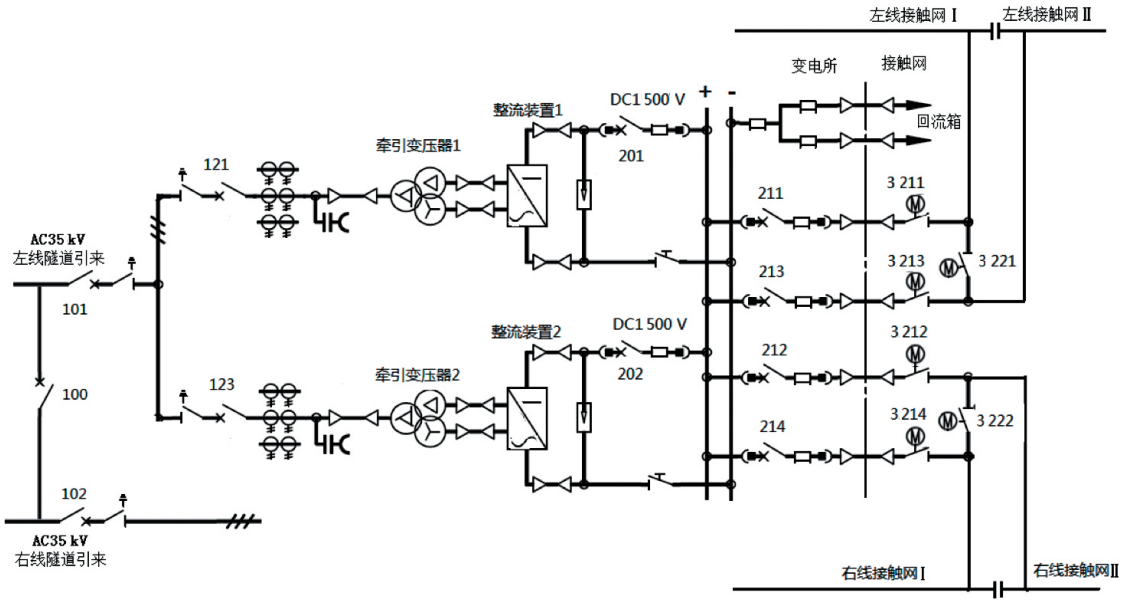

图1　某牵引变电所的供电示意图

接触网前后相邻两段供电（接触网在此处设绝缘锚段关节），同时前后相邻的两座牵引变电所也向此两段接触网分别供电，即双边供电。当一座牵引变电所解列时，由相邻牵引变电所越区供电；当某个牵引变电所一台整流装置出现故障或检修时，另一台整流装置具备运行条件时继续运行。

看法及建议

1. 减少作用不大的直流断路器

当有一段接触网（假设左线）发生故障时（比如短路），现有设计思路是通过断开两相邻双边供电牵引变电所直流断路器（断路器211和左线接触网Ⅰ另一端变电所的断路器），把故障段接触网切除，而保障无故障的接触网仍然正常供电。但地铁的特点是一个方向只有一条轨道，当某一处出现不能行车的故障时，该方向后方的列车全部到附近车站待命后停止运行，如果抢修的时间较长，前方及另一个方向在运行的地铁列车回停车场后也将停止运行。地铁列车运行的时间间隔一般为6～8 min，刚出故障的时刻，前后相邻的地铁列车一列会在故障接触网相邻段远端，另一列不在另一相邻段接触网上，如果像北京高峰时段间隔2.5 min的情况，相邻的地铁列车会在故障接触网相邻段中远端。此种情况下，故障接触网前后相邻段由远端单边供电可满足需要（设计本身满足相邻牵引变电所越区供电），没必要本变电所再向故障接触网相邻段供电，因此向前后两段接触网供电的两回路各设一台直流断路器作用不大，只保留一台直流断路在接触网发生故障时断开线路即可（如图1中左线只保留211）。

至于两台整流装置直流正极并联处的两台断路器（图1中201、202），在整流装置投入或退出运行、以及向外输电时，操作高压断路器（图1中121）可满足要求（停送电时负载基本为“0”），设置这两台直流断路器作用也不大。

2. 无故障状态下，联锁上以高压侧进行停送电操作为宜

每晚收车后，直流牵引供电网负载基本为“0”，同时地铁维护人员要进行维护作业，接触网需停电，若只在直流开关处断电，则会出现一条地铁线几十台约3 000 kV·A变压器空载运行约5 h的情况。除对功率因数产生影响外，空载电流产生的能耗也不应忽视（当变压器稳态运行时，空载电流为额定电流的0.15%～10%）。这对于电力公司的规定来说是不希望存在的，对地铁运营公司的成本来说是不经济的。如果每晚停电，先断开馈出线路直流断路器，再断开牵引变压器高压侧断路器，那么直流断路器操作是多余的，因为地铁列车收车后接触网负载基本为“0”。另一方面，每天早晨都是接触网送电后地铁列车才升弓，这之前接触网基本也是空载。两种情况，分合高压断路器都是变压器基本无负载的情况下进行的，因此无需再操作直流断路器。在高压侧闭合线路，变压器会产生额定电流6～8倍的涌流，目前已有抑制变压器空载合闸励磁涌流的技术。还应当看到高压侧电流小且交流电有过零点，电流易断开。而直流侧电压低电流大、电流无过零点，比交流电断开要难一些。图2是某地铁在调试时直流断路器触头被电弧烧灼后的照片，后进行了更换。

图2　被电弧烧灼后的直流断路器触头

开关设置调整

按上述分析，控制馈出直流上网电缆的断路器左、右线（轨道）各保留一个（如左线接触网保留211，右线接触网保留212），其分断能力应按短路最不利情况下的电流来选定，直流进线柜的断路器改为隔离开关（图3中201、202），示意图如图3所示。

改进后仍能满足设计功能，当有一台整流装置发生非正极短路故障时，一般不会影响另一台整流装置，此情况下发生故障的整流装置会在变压器上端35 kV高压断路器跳闸（如断路器121或123），然后再断开整流装置直流侧隔离开关（如201或202），切除故障整流装置，另一台无故障整流装置继续工作。

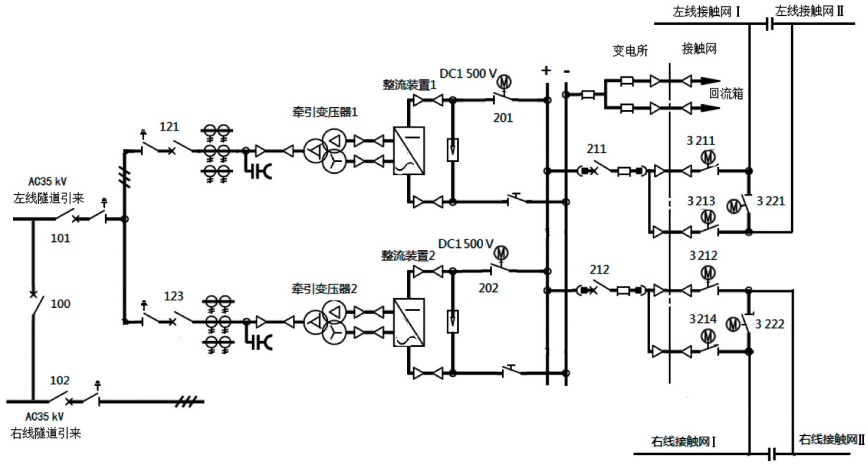

图3　调整后的供电示意图

（下转第53页）

实际测量过程中是在重复性条件下测量3次，以3次测量值的算术平均值为该测量点的实测值$\bar{M}$，即

$$u_{11}(\bar{M})=\frac{s(M_i)}{\sqrt{n}}=1.534/\sqrt{3}\approx 0.886 \quad (4)$$

9）扭矩扳子检定仪的示值分辨力引起的不确定度分量$u_{12}(\bar{M})$的评定。

该项不确定度分量服从均匀分布，取覆盖因子

$$k=\sqrt{3} \quad (5)$$

标准不确定度为

$$u_{12}(\bar{M})=0.001/2\sqrt{3}=0.000289 \quad (6)$$

$u_{11}(\bar{M})$和$u_{12}(\bar{M})$取大者，即

$$u_{11}(\bar{M})=0.886 \quad (7)$$

10）标准器不确定分量$u_2(\bar{M})$的评定。

估计为均匀分布，用B类方法评定，即

$$u_2(\bar{M})=a/k=(201.612\times 1\%)/\sqrt{3}\approx 1.164 \quad (8)$$

11）温度不确定分量的评定。

在检定过程中由于温度变化不超过±1℃，则温度影响可忽略不计。

12）标准不确定度汇总表如表2所示。

13）合成标准不确定度。

$$u^2(\bar{x})=c_1^2u_1^2(\bar{x})+c_2^2u_2^2(\bar{x}) \quad (9)$$

上述各不确定度分量独立不相关，因此

$$u_c=\sqrt{0.886^2+1.164^2}\approx 1.462 \quad (10)$$

14）扩展不确定度。

$$U=k\times u_c=2\times 1.462\approx 2.294 \quad (11)$$

$$k=2$$

（5）检定或校准结果的验证

选一把编号616011543、准确度等级为3级、测量范围为40～340 N·m的扭矩扳子，在本装置上自检一组数据；由上一级天津计量监督检测科学研究院0.3级的标准装置测得一组数据y_{lab}，y_{ref}结果如表3所示。

y_{lab}和y_{ref}两者的包含因子近似相等的前提下应满足$|y_{lab}-y_{ref}|\leqslant U_{lab}$即$|y_{lab}-y_{ref}|\leqslant 2.924$ N·m。比较结果最大差值为2.61 N·m，符合考核规范要求，该标准装置总不确定度得到验证。

（6）结论

该标准装置经计量标准的测量重复性考核、计量标准的稳定性考核、测量不确定度评定、计量标准的测量不确定度验证，完全符合国家计量检定系统表、国家计量检定规程JJG707—2014《扭矩扳子检定规程》的要求，可以达到开展3级及以下、测量范围3～2 000 N·m扭矩扳子的检定。

综上所述，计量室按照《计量标准考核规范》的要求，在软、硬件方面已全部具备建立扭矩计量标准的条件。通过申报、现场考评等取得了《扭矩扳子检定装置》考核证书。此项标准建立后，一改了往日向外送检的现状，实现了完全自主检定，既充分利用了现有人力资源，保障了人身安全，又大大降低成本支出；既保证了量具的充足可靠，又做到了“靠标准修车、以量值评判”。应该说计量是手段，标准是依据，质量是目的，三者之间是密切相关的，不可分割的。计量工作在铁路机务段的地位应该是相当重要的，它的作用是不容忽视的或用其他方式代替的。EA

表2　标准不确定度汇总表

标准不确定度分量$u(M_i)$	不确定度来源	标准不确定度分量/（N·m）
$u_1(M_i)$	扭矩测量标准的测量重复性等	0.886
$u_2(\bar{M}_i)$	扭矩测量标准的示值准确度	1.164

表3　测量结果

标准扭矩/（N·m）	本标准装置测量结果y_{lab}/（N·m）	上一级标准装置测量结果y_{ref}/（N·m）	传递比较结果差值$\lvert y_{lab}-y_{ref}\rvert$/（N·m）
68	68.68	70.7	2.02
200	201.58	202.1	0.52
340	339.89	342.5	2.61

（上接第48页）

当发生整流装置正极对地短路时，两台整流装置并联，高压断路器121、123及直流断路器211、212同时跳闸（此时会有从接触网来的反向电流，需用直流断路器断开），切除故障点，隔离开关3221、3222闭合，3211、3213、3212、3214断开，前后两牵引变电所越区供电。当区间接触网发生故障时，对其双边供电的两相邻变电所内对应的左线（轨道）或右线（轨道）直流断路器跳闸断开故障点（如左线故障时断路器211断开，右线故障时断路器212断开），相对应的隔离开关断开，故障接触网前后相邻两段由更远处相邻的变电所单边供电（如图3所示，假如左线接触网Ⅰ切除，接触网Ⅱ由相邻的变电所供电，故障接触网Ⅰ的另一端同理）。

直流牵引供电线路上使用的设备越多，出现故障的概率越大，在满足功能要求的前提下应尽量减少设备数量。通过改进，每座牵引变电所可减少4台直流断路器。

对于变压器空载运行的分闸操作，以及每天早晨送电的合闸操作，因负载基本为“0”，建议用高压断路器来完成。直流断路器只在电线路故障时操作。EA