

[变压器]

动车组用牵引变压器 温升试验补偿电容计算

文/李晓辉 兰日辉 张泽琦 李长春
大同ABB牵引变压器有限公司

牵引变压器安装在电力机车及电动车组上，是重要的供电设备。针对国内某动车组牵引变压器的设计参数，分析了其在温升试验时对供电电源的需求。计算了在选择变频器和中间变压器的19 800 V/38 A档位及并联电容值装置电容器组3组串联的供电方式时，可以满足温升试验要求。

牵引变压器安装在电力机车及电动车组上，是重要的供电设备。牵引变压器包括一个网侧绕组以及2、4、6或8个牵引绕组，同时，可依据实际需求设置辅助绕组。牵引变压器容量可达到13 000 kV·A，效率约96%，网侧绕组额定电压为25 kV，短路阻抗变化范围为16%~72%。

依据GB/T 25120—2010《轨道交通机车车辆牵引变压器和电抗器》的规定，牵引变压器在型式试验时需要进行温升试验。温升试验可采用直接负载法、背靠背法和短路法。由于短路法最为简单，故牵引变压器在进行温升试验时一般采用短路法。采用短路法进行温升试验时，将网侧绕组连接供电电源，牵引绕组依次串联后短路，电气接线如图1所示。

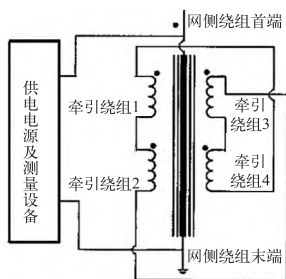


图1 短路法电气接线图

温升试验过程中变压器本身属于感性负载。为了减小变压器温升试验时对试验设备容量的需求，节约设备投资成本，变压器在温升试验时通常采用并联电容器装置进行无功补偿。

国内某动车组牵引变压器原理样机额定参数

国内某动车组牵引变压器作为整车的关键零部件，需面向科技前沿，做好基础共性、前瞻性技术储备，以提高整车安全性、舒适性和经济性为目标，打造出具有代际特征的动车组牵引变压器。其额定参数见表1。

表1 国内某动车组牵引变压器额定参数

	网侧绕组	牵引绕组
额定功率/(kV·A)	7 100	1 775 × 4
额定电压/V	25 000	1 900 × 4
额定电流/A	284	934 × 4
额定频率/Hz	50	
短路阻抗/(%)	42.5 ± 10	
总损耗/kW	295	

温升试验时电容补偿原理

牵引变压器的短路阻抗由电抗分量和电阻分量

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目（P2020J023）

两部分组成,其中电抗分量为主要成分。牵引变压器温升试验时输入的电流主要为感性无功电流。因此,为了提高温升试验时的功率因数,减小供电电源容量,牵引变压器温升试验时在网侧绕组并联电容器装置用于补偿无功分量。温升试验接入补偿电容后,由于流过电容器的容性电流与牵引变压器网侧绕组中的感性电流相位相反,抵消一部分感性电流,因而减少了供电电源的输出电流。电容器无功补偿原理图如图2所示,阻性电流 I_R 与电压 U 同相位,感性电流 I_L 的相位滞后于电压 U_{90° ,容性电流的相位超前于电压 U_{90° 。接入补偿电容前,供电电源输出电流为 I_2 ,功率因数为 $\cos\phi_1$;接入补偿电容后,供电电源输出电流为 I_L ,功率因数为 $\cos\phi_2$ 。容性电流 I_C 的接入,抵消了一部分感性电流 I_L ,使供电电源输出电流由 I_1 减小为 I_2 ,功率因数由 $\cos\phi_1$ 提高为 $\cos\phi_2$ 。

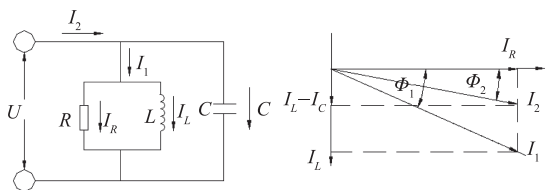


图2 电容器无功补偿原理图

电容补偿电容器装置设计方案

1. 电容器基础知识

电容器串并联的特点见表2,当 n 个电压均为 U_0 、电容均为 C_0 的电容器串联时,其等效电压 $U=nU_0$,等效电容 $C=C_0/n$ 。当 n 个电压均为 U_0 、电容均为 C_0 的电容器并联时,其等效电压 $U=U_0$,等效电容 $C=nC_0$ 。

表2 电容器串并联特点

	串联	并联
电压特点	总电压等于各个电容器电压之和 $U=U_1+U_2+U_3+\dots$	每个电容器两端的电压相等并等于外加电压 $U=U_1=U_2=U_3=\dots$
电容特点	总电容的倒数等于各个电容器电容的倒数之和 $\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}+\dots$	总电容等于各个电容器电容之和 $C=C_1+C_2+C_3+\dots$
电荷量特点	每个电容器的电荷量相等并等于等效电容器的电荷量 $Q=Q_1=Q_2=Q_3=\dots$	总电荷量等于各个电容器的电荷量之和 $Q=Q_1+Q_2+Q_3+\dots$

基于上述分析可知,在实际应用中,当电容器的耐压值小于外加电压时,可采用将电容器串联的连接方法来获得较高的额定工作电压;当电容器的

电容小于实际需求电容时,可采用将电容器并联的连接方法来获得较高的电容。

电容器输出电流 I 与施加电压 U 及电容 C 的关系为 $I=2\pi fCU$ 。其中, f 为供电频率。

2. 电容器装置

本次温升试验计划采用的电容器装置的额定容量为12 024 kvar,额定电压为19.8 kV,最大电流为1 821.8 A,频率为50 Hz。装置共36台BFM₄₉6.6-334-1型单相并联电容器,分成3组,每组12台。其中,B为电容器系列代号,代表并联电容器;A为浸渍介质代号,代表卡基甲苯;F为浸渍介质代号,代表二芳基乙烷;M为基间主介质代号,代表全膜;6.6表示电容器的额定电压,单位为kV;334表示电容器的额定容量,单位为kvar;1表示电容器为单相。

每组按电容器单元1台、2台、4台和5台配置隔离开关,可组成1~12台并联电容器的任意组合。每组中的电容器单元投入和切除由单极气动隔离开关QDG-12 kV/400 A和QDG-12 kV/600 A控制,每组电容器及电容器装置进出线的开闭由单极气动隔离开关QDG-20 kV/2 000 A控制。每个电容器串联熔断器作为外部保护装置,内部放置放电电阻,使电容器与外电路断开后能自行放电。

电容器单元及电容器组的投入和切除采用自动隔离开关进行操作,装置以电位钳位的方式使电容器外壳及框架的电位固定,保证装置安全可靠地运行。

电容器装置及电容器组的电气接线图如图3和图4所示。

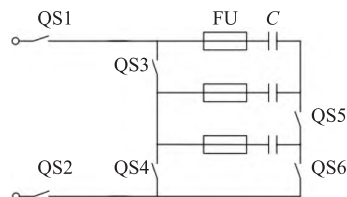


图3 电容器装置电气接线图

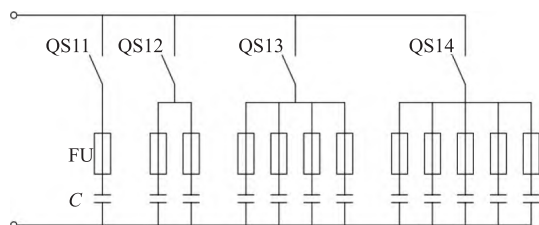


图4 电容器组电气接线图

图3和图4中，C为电容器单元；FU为熔断器，其作用是切除故障电容器单元，在设备安全允许切除台数之内时，让电容器装置继续运行；QS为隔离开关，其作用是关合电容器单元及电容器组。

电容器组隔离开关状态见表3，电容器装置隔离开关状态见表4。表中●代表闭合，○代表断开。

表3 电容器组隔离开关状态

并联数量	电压/kV	电容/ μF	QS 11	QS 12	QS 13	QS 14
1	6.60	24.41	●	○	○	○
2	6.60	48.81	○	●	○	○
3	6.60	73.22	●	●	○	○
4	6.60	97.63	○	○	●	○
5	6.60	122.03	○	○	○	●
6	6.60	146.44	○	●	●	○
7	6.60	170.85	○	●	○	●
8	6.60	195.25	●	●	○	●
9	6.60	219.66	○	○	●	●
10	6.60	244.07	●	○	●	●
11	6.60	268.47	○	●	●	●
12	6.60	292.88	●	●	●	●

表4 电容器装置隔离开关状态

	工况1	工况2	工况3
电容器组连接方式	3并	2串	3串
电压/kV	6.6	13.2	19.8
最大等效电容/ μF	879	146	98
QS1	●	●	●
QS2	●	●	●
QS3	●	○	○
QS4	○	●	○
QS5	●	○	○
QS6	●	○	●

3. 电容器装置在实际使用时的注意事项

当电容器组串联时，每组电容器的电压与电容成反比，电容值低的电容器组承担的电压更高。因此，在电容器装置组装时，应该对每组电容器电容进行平衡分配，使每个电容器组的电容尽可能接近。

电容器组不应承受超过额定电压110%的持续电压。电容器组应尽量避免在过电压下运行，长期过电压运行会影响电容器使用寿命。

为了保证电容器装置的正常运行，应做定期检查：①对电容器单元进行电容量测定，如测量值大于出厂值的10%，应予更换；②检查熔断器的状

态，如已烧损应予更换；③对电容器单元的外观是否损坏、外壳是否膨胀、表面污秽度及是否渗漏等进行检查。

温升试验时补偿电容计算

国内某动车组牵引变压器温升试验时，电压、电流及功率因数的计算见表5，分为工况1、工况2和工况3。工况1对应短路阻抗为设计值的下限，工况2对应短路阻抗为设计值，工况3对应短路阻抗为设置值的上限。牵引变压器容量为7 100 kV·A，效率约为96%，总损耗为295 kW。网侧绕组额定电压为25 kV，额定电流为284 A。各工况短路阻抗分别为38.3%、42.5%及46.8%。

表5 温升试验时变压器参数计算

	工况1	工况2	工况3
试品容量/(kV·A)	7 100	7 100	7 100
频率/Hz	50	50	50
试品效率/(%)	95.845	95.845	95.845
试品总损耗/kW	295	295	295
试品网测额定电压/kV	25	25	25
试品网测额定电流/A	284	284	284
短路阻抗/(%)	38.25	42.5	46.75
试验电压/kV	9.563	10.625	11.688
功率因数	0.108 6	0.097 8	0.088 9
有功电流/A	31	28	25
无功电流/A	282	283	283

本次试验采用的供电电源设备为1 000 kV·A的三相变频器及3 400 kV·A的三相中间变压器，可以输出三相交流电，也可以输出单相交流电。当输出单相交流电时，其额定输出电压和电流有：19 800 V/38 A、6 600 V/115 A、1 500 V/504 A和500 V/1 512 A，四个档位。由于本案例中温升试验时的网侧绕组电压最低为9.563 kV，故只能选取19 800 V/38 A档位。此时试验设备的额定输出电流为38 A，远小于试验变压器的额定电流，需要并联电容器进行无功补偿。

考虑温升试验时的网侧绕组电压最低为9.563 kV，采用电容器组3组并联的方式已经不能满足试验电压的要求，故可以采用电容器组2组串联或3组串联的方式。当采用电容器组2组串联的补偿方式时，需要中间变压器输出电压和电流见表6。当采用电容器组3组串联的补偿方式时，需要中间变压器输出电

压和电流见表7。

表6 电容器组2组串联计算方案

	工况1	工况2	工况3
电容器组连接方式	2串	2串	2串
电容器单元输出电流	36.66	40.73	44.81
投入电容器单元数量/A	7	6	6
实际补偿电流/A	257	244	269
补偿后剩余无功电流/A	25.69	38.24	14.03
补偿后功率因数	0.77	0.59	0.87
中间变压器输出电流/A	40	47	29
中间变压器输出功率/kW	384	502	338

由表6可知，对于工况1和工况2，需要中间变压器输出的电流大于其额定输出电流，不能满足应用要求。

表7 电容器组3组串联计算方案

	工况1	工况2	工况3
电容器组连接方式	3串	3串	3串
电容器单元输出电流/A	24.44	27.16	29.87
投入电容器单元数量	11	10	9
实际补偿电流/A	269	272	269
补偿后剩余无功电流/A	13.5	11.1	14.0
补偿后功率因数	0.92	0.93	0.87
中间变压器输出电流/A	34	30	29
中间变压器输出功率/kW	322	318	338

由表7可知，对于工况1、工况2和工况3，需要中间变压器输出的电流均小于其额定输出电流，满足应用要求。在投入并联补偿电容器装置前，牵引变压器温升试验时输入的无功电流分别为282 A、283 A和283 A，功率因数分别为0.108 6、0.097 8和0.088 9。投入并联补偿电容器装置后，牵引变压器温升试验时输入的无功电流分别为13.5 A、11.1 A和14.0 A，功率因数分别为0.92、0.93和0.87。

结束语

针对国内某动车组牵引变压器的设计参数，分析了其在温升试验时对供电电源的需求。分析计算了在选择变频器和中间变压器的19 800 V/38 A 档位及并联电容值装置电容器组3组串联的供电方式时，可以满足温升试验要求。

(收稿日期：2022-12-26)

参考文献

[1] 许恺，李彦辉，陈骥群，等．电力电子牵引变压器中的单相PWM整流器控制策略的研究[J]．电气应用，2020，39(12)：55-62．
[2] 陈静．基于声音信号分析的牵引变压器故障诊断方法研究[J]．电气应用，2020，39(2)：25-29．

