

[薄膜电容]

上海地铁某线路薄膜电容故障分析及可靠性改进

文/王睿铁 沈青 王靖
上海地铁电子科技有限公司

金属化薄膜电容应用广泛。针对上海地铁车辆使用的某薄膜电容在预期使用寿命内电容容值大幅下降的现象，基于电容容值衰减规律和对地铁列车辅助供电系统的影响，分析了产生这一现象的原因，为地铁列车用薄膜电容的设计制造及制定薄膜电容检修维修方案提供参考。

金属化薄膜电容是在塑料薄膜上以真空蒸镀一层很薄的金属膜作电极，再将此类金属膜卷绕而成，可以制成小体积、大容值产品。薄膜电容使用寿命长，耐压性能及纹波电流承受能力优势明显，因而广泛应用于轨道交通车辆、通信、太阳能发电及家用电器等领域。

针对上海地铁某线路采用的日本NICHICON公司生产的滤波电容，在预期使用寿命内容值大幅下降的原因进行分析，为薄膜电容的选型、地铁列车用薄膜电容的设计制造及制定检修维修方案提供参考。

故障现象

薄膜电容在地铁车辆上主要用作直流进线端的DC-link电容、交流输出侧的滤波电容等。发生故障的滤波电容现场测试结果见表1，测试时间为2016年12月，电容型号为GC407350，每个容值为2 400 μF，4个并联连接。从表1中可以得出，使用了7.25年的产品，容值下降量为44.9%~66.4%，而使用了5.25年的同一型号产品，其容值下降量为9.1%~21.8%。由此可见，随着工作时间延长，电容容值下降速度处于快速递增模式，意味着该批电容金属膜介质的绝缘特性下降是一个由慢到快的变化过程，如果继续使用，容值下降速度更加迅速。

表1 故障电容现场测试结果

生产时间	容值测量结果/μF	容值降低率 (%)
2009.09	5 271	45
	5 281	44.9
	3 743	61
	4 457	53.5
	3 219	66.4
2011.09	7 825	18.5
	8 532	11.1
	7 507	21.8
	8 592	10.5
	8 721	9.1

根据电容的工作机理，在电容性能退化过程中，容值与使用时间之间满足指数函数分布规律，即

$$y=ae^{bx} \quad (1)$$

式中， y 为电容容值； x 为使用时间； a 、 b 为待求参数。

将表1中同一年份生产的电容测试结果取平均值，得到两组数据，联立解方程，可求得 a 、 b ，可得该产品的容值与使用时间满足如下关系

$$y=82158e^{-04118x} \quad (2)$$

根据产品手册，额定工况下该产品的设计寿命为138 700 h，按每天工作18 h、一年365天计算，

设计使用寿命约21年。根据GB/T 25121—2010《轨道交通 机车车辆设备 电力电子电容器》规定,电容使用寿命内容值下降量不超过5%,该产品的容值下降速度已大大超过正常范围,这批电容在5年内已全部报废,远低于设计寿命。根据实际测试情况,电容器容值大幅下降,但损耗保持不变,电容器其他性能参数正常,说明电容器本身自愈性能非常好。由薄膜电容的构造机理可推测出造成这种结果应是薄膜介质绝缘性能不正常提前老化导致被击穿而产生不合理的自愈所致。

仿真分析

为研究薄膜电容容值衰减对地铁列车的影响,以交流侧滤波电容为例,分析容值衰减对辅助供电系统的影响。辅助供电系统的MATLAB仿真模型如图1所示,研究对象为图1中矩形框内的三相电容。设置模型参数与实际系统保持一致。来自接触网的DC 1500 V电压经逆变后进行滤波,输入给变压器,得到AC 380 V、50 Hz的输出。考虑到实际系统空调负载加载过程较长,为节省仿真运行时间,将空调负载加载过程按照实际情况进行等比例缩减,变化趋势与实际系统相同。

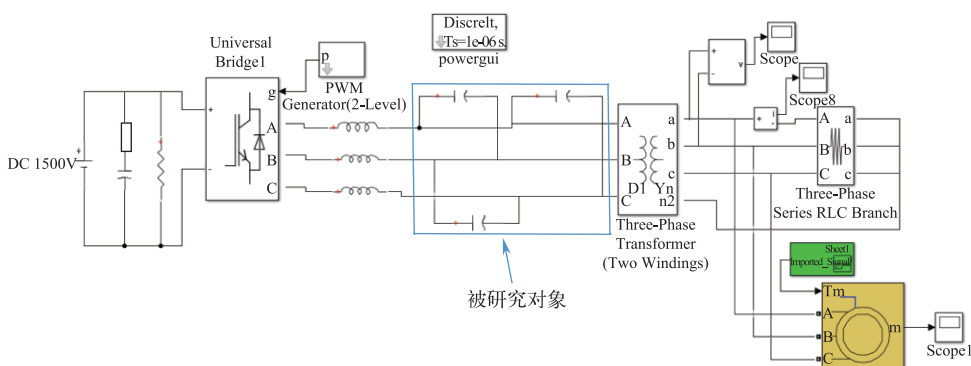


图1 辅助供电系统仿真模型

三种情况下辅助供电系统输出电压谐波分析如图2所示,分别是电容容值正常的状态、电容容值

衰减40%的状态及电容容值衰减60%的状态。

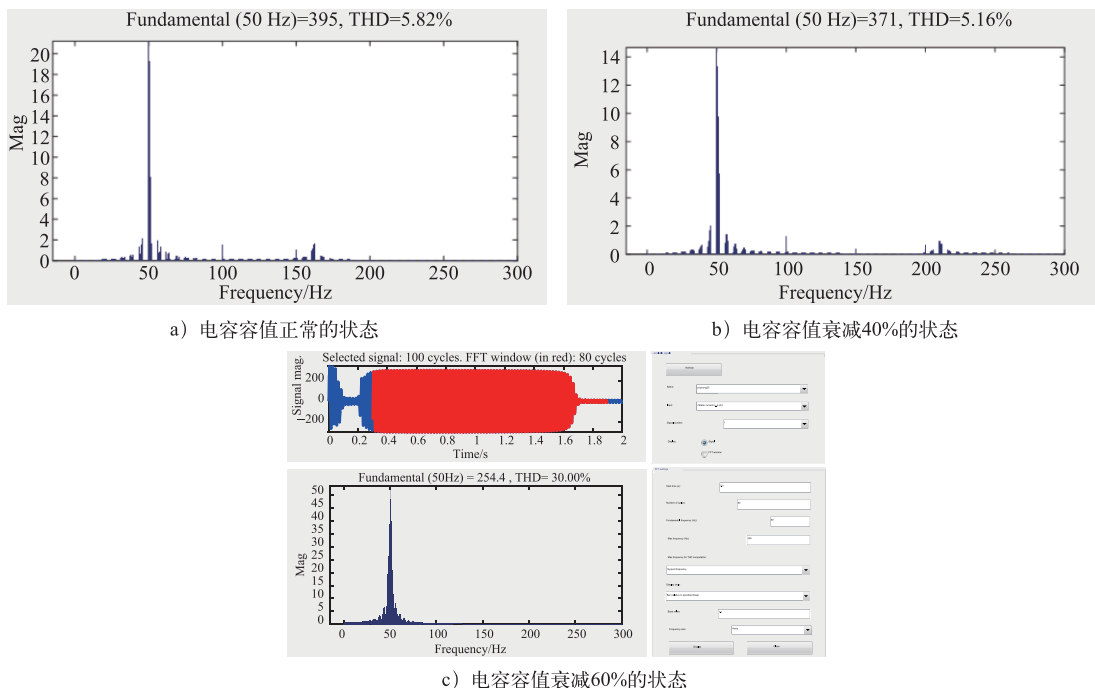


图2 滤波电容在不同状态时的输出电压谐波分析

从仿真结果可以看出,随着电容性能退化,辅助供电系统输出电压大幅降低,远远不能满足地铁车辆 $400\text{ V} \pm 5\%$ 交流输出的要求。并且,随着电容容值衰减,基波附近谐波成分明显增多,谐波含量增大,甚至THD达到了30%,严重影响了系统正常工作。

原因总结

故障电容器的外观及内部构造如图3所示。针对这一故障现象,电容器制造商给出的判断是:因用绝缘膜绕卷成圆筒形构造的电容器素子内部可能存在残留空气层,在此状态下不断使用后薄膜绝缘性逐渐降低,从而引起容值快速下降。实际上这种可能性很小,因为在电容器元件外包层上包裹着的树脂可起到隔离外界空气作用,而外包层是额外包裹在金属膜外表面的包裹膜,起到保护金属膜作用。通常来说,树脂内部残留的气泡非常少,对金属膜绝缘性能不会产生实质性影响。对于应用在地铁列车上的薄膜电容而言,其金属膜介质的电气绝缘性能取决于以下几方面。

1) 薄膜材料特性、厚度的合理选用。如果电容器设计不合理,如薄膜厚度选取不当,余量不足(例如太薄),每微米厚度承受的电压太高,不足以承受系统电压。随着时间的增长,介质绝缘性能将加速老化,出现击穿产生自愈现象,电容器总的容值就会下降。

2) 电容器结构设计不合理,导致不能承受合理的额定电流,必将引起温升超标,引起介质绝缘性能下降,导致薄膜介质出现击穿产生自愈。

3) 元件卷绕后膜之间残留的空气、水分等影响电气绝缘性能的物质,若生产工艺不合理,真空去除处理干净的程度不到位,引起介质绝缘性能下降。

4) 如果地铁DC 1 500 V供电系统过电压波动超出设计范围,引起地铁车辆变流器中间回路电压过高,而电容器本身设计余量不足,导致薄膜介质绝缘性能下降。

综上所述,故障电容器可能是为了追求体积更小、重量更轻而采用了较薄的膜($7\text{ }\mu\text{m}$),导致设计余量不够,还有可能在再生制动工况下中间回路电压升高值估计不足,造成容值大幅快速下降。

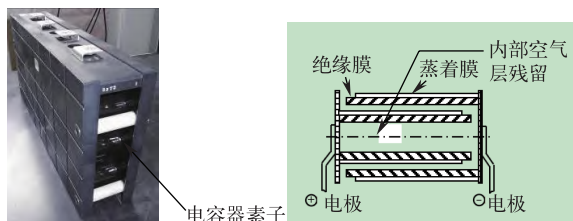


图3 电容器外观及内部素子截面图

改进措施

为增加电容器的可靠性,减少性能退化,首先电容制造商要判断电容器薄膜介质设计是否合理、工艺处理是否到位,最合理的方法就是按照技术条件(规格书)及GB/T 25121—2010《轨道交通机车车辆设备电力电子电容器》进行耐久性试验和温升试验。试验要求为:

1) 耐久性试验。试验前后两次测量的容值之差应小于初始值的3%;

2) 温升试验。试验前后电容值变化应不超过 $\pm 1\%$,损耗应满足

$$\tan\delta \leq 1.2\tan\delta_0 + 0.000\ 1 \quad (3)$$

式中, δ 为试验前的损耗值; δ_0 为试验后的损耗值。

若检测发现介质存在问题,需要重新修正。另外,在设计余量上应充分考虑地铁列车运行中的各种状况,比如列车制动带来的中间电压升高、系统谐波干扰等。

其次,对于电容用户尤其是地铁车辆这类要求高可靠性的设备而言,须定期进行电容检测。电容故障或性能下降引起系统输出不正常的,如本文中出现的辅助供电系统输出严重偏低,造成逆变器闭锁、退出运营的现象,在检修过程中需要对电容进行必要的测试。[EA](#)

(收稿日期:2022-10-21)

参考文献

- [1] 葛兴来,张艺驰,杨宁.车载牵引变流器关键部件寿命评估综述[J].电源学报,2021,19(4):140-152.
- [2] 杨惠兰,侯涛,刘淳.金属膜电容老化特性及寿命模型研究[J].现代工业经济和信息化,2020,8(10):19-22.