

[功率器件]

高海拔环境对牵引供电系统中电力电子功率器件寿命的影响

文/四川艾德瑞电气有限公司 王志强

功率器件（IGBT）的可靠性将影响到整个牵引供电系统的稳定运行，阐述了电力电子功率器件（IGBT）的构成、用途及失效机理，分析了高海拔气候环境对电气化铁路牵引供电系统中电力电子功率器件（IGBT）的影响因素，提出了高海拔气候环境条件的应对措施。

随着川藏铁路建设和青藏铁路电气化改造项目的推进，对电气化铁路牵引供电系统提出了更高的要求。为了解决长大坡道、电网薄弱地方的供电问题，出现了一些应用电力电子功率器件（IGBT）的新型电气设备，如再生制动能量利用装置、虚拟同相供电装置和电源净化装置等，这些装置既可以解决工程现场存在的实际问题，又可以起到无功补偿的作用。上述装置中功率器件（IGBT）的可靠性将影响到整个牵引供电系统的稳定运行，对牵引供电系统中功率器件（IGBT）进行可靠性分析，是提高牵引供电系统可靠性的有效措施。高海拔环境下，功率器件（IGBT）主要受环境条件、负载、机械振动和加载在电力电子系统上的应力等因素影响，因此，研究并提高高海拔环境下功率器件（IGBT）可靠性就显得尤为重要。

本文将通过分析高海拔环境条件对牵引供电系统中功率器件（IGBT）寿命的影响，从装置设计及选型的角度提出高海拔地区的应对措施。

电力电子功率器件（IGBT）

功率器件（IGBT）模块主要由模块芯片、陶瓷衬板、金属基板、焊接层、键合引线、电极、填充硅胶及封装外壳组成。其中，模块芯片是整个IGBT模块的核心部分；陶瓷衬板用来支撑芯片和金属基板之间的绝缘，衬板正面有多个金属区，分别作为IGBT芯片电极引出的关键部分和电

流中转通道如集电极（阳极）、发射极（阴极）与栅极；金属基板是衬板的支撑平台，是整个IGBT模块的散热通道，是安装外部散热器的端口，即散热器安装在基板的非焊接平面；焊接层将模块芯片与陶瓷衬板的上部铜层、陶瓷衬板的上部铜层与基板、引出电极与陶瓷衬板的上部铜层连接成一个稳固的功能模块；键合引线用来实现电极与IGBT、FWD芯片的连接。引线以并联的方式一端键合在芯片上，另一端键合在衬板的上部铜层；电极为芯片电流的汇聚通道；填充硅胶用来保护陶瓷衬板、模块芯片和键合引线免受环境湿气、酸碱腐蚀等冲击以及保护模块内部免受机械冲击和固定内部构件等作用；封装外壳又称之为管壳，由侧框与管盖组成，与填充硅胶一起保护模块内部不受外部环境的影响。功率器件（IGBT）模块结构图如图1所示。

随着科学技术的飞速发展，功率器件（IGBT）呈现出高电压、大电流、高频率和低损耗的发展趋势。功率器件（IGBT）作为再生制动能量利用装置、虚拟同相供电装置和电源净化装置中的核心部件，在实际运行中，由于受到外

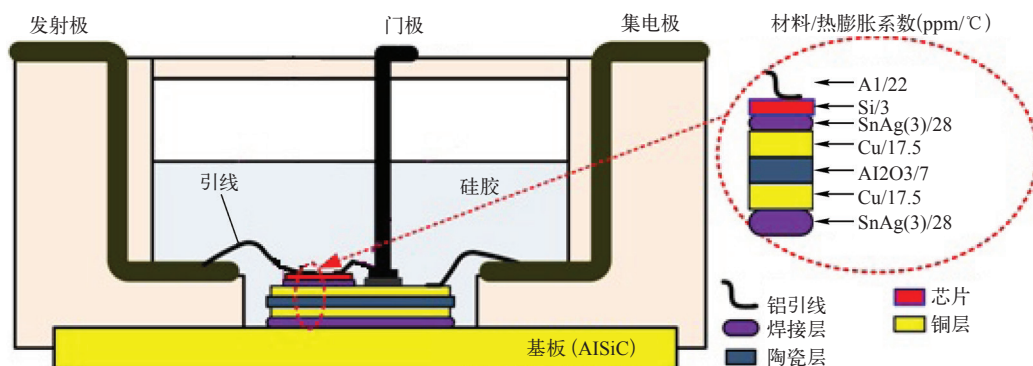


图1 IGBT模块结构

界环境因素的影响，会导致模块中不同材料中温度、热应力分布不均匀，进而造成老化应力，焊接材料在该交变热应力的长期反复作用下使得材料产生蠕变疲劳，进而产生初始裂缝，裂缝扩展最终导致模块失效。功率器件（IGBT）的可靠性可用Bathtub曲线来描述，功率器件可靠性的浴盆曲线如图2所示。

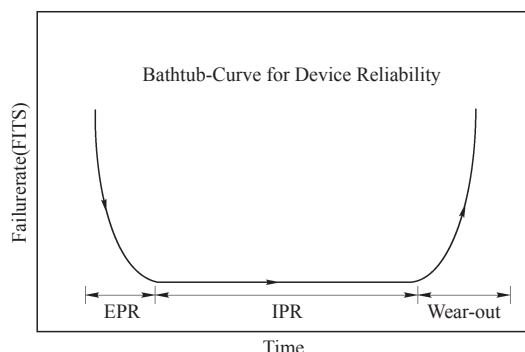


图2 功率器件可靠性的浴盆曲线

高海拔气候条件对电力电子功率器件（IGBT）寿命的影响

高海拔地区的气候条件主要特点是气压低、温度低、温差大、气候干燥、太阳辐射强及雷暴日多等。

1. 低气压的影响

低气压对功率器件（IGBT）的影响主要体现在以下几方面。

（1）对绝缘介质强度的影响

空气压力的降低会引起功率器件外绝缘强度的降低，在5 000 m海拔范围内，海拔每升高1 000 m，外绝缘强度降低8%~13%。

（2）对电晕及放电电压的影响

高海拔低气压会造成功率器件的局部放电起始电压降低，电晕起始电压降低，电晕腐蚀严重。

（3）对电气间隙击穿电压和爬电距离的影响

空气压力及空气密度随着海拔高度的升高呈降低趋势，低密度的空气在电场中更容易发生电

离，使击穿电压也下降；为了保证高海拔环境条件下使用的功率器件与平原上有相等的抗击穿电压，需对电气间隙和爬电距离进行修正，增大功率器件的电气间隙。

（4）对温升的影响

对于高海拔环境，随着海拔升高，空气密度呈下降趋势，由于功率器件本身的发热较高，如以空气作为散热介质，功率器件的散热比较困难，可能会造成功率器件寿命下降，甚至烧毁。

2. 温度的影响

随着海拔高度的升高，空气温度呈下降趋势，且昼夜温差变大，海拔每升高100 m，环境空气温度降低0.5℃，这将对电气设备的温升起到一定的缓减作用；过低的温度会造成功率器件内绝缘材料及金属部件机械性能降低，变硬变脆；大温差会造成功率器件密封结构破坏、绝缘材料老化及变形等。

3. 干燥气候的影响

高海拔地区干燥气候会加剧静电电荷的产生，静电积累后的放电会导致功率器件击穿进而失效，同时会影响到功率器件控制信号的误动作。

4. 雷暴的影响

高海拔地区的平均雷暴日要远远高于平原地区，功率器件遭受雷击的概率增加，雷电产生的冲击过电压会导致功率器件绝缘击穿，器件烧毁等。

应对措施

1. 电气绝缘性能的应对措施

针对电气绝缘性能，从以下两方面进行应对：①高海拔地区使用装置的外绝缘应按照GB 311.1进行海拔修正后的技术参数进行设计。②高海拔地区使用装置的电气间隙及爬电距离应按照IEC 60664—1的规定进行海拔高度修正后的参数进行设计。

2. 温度影响的应对措施

针对温度的影响，从以下两方面进行应对：
 ①由于高海拔地区空气稀薄会导致风流量减少，直接影响风冷系统的散热，也间接影响水冷系统的散热，因此在装置设计时应适当增加散热器或风机的数量和降低系统的额定输出电流使用。②功率器件选型时应考虑低温影响，尽量选择抗低温器件，同时增加封装外壳的防护等级及在装置内部设置加热除湿装置。

3. 干燥气候影响的应对措施

针对干燥气候的影响，从以下三方面进行应对：①功率器件及设备选型时应充分考虑抗静电

措施。②装置外壳及金属零部件应连续导通，金属零部件间应保持良好的面接触，装置整体应采用单点接地。③装置电气设计时，应考虑采用滤波技术和光电耦合技术。

4. 雷暴影响的应对措施

针对雷暴的影响，结合当地的气候特征，在装置内部增加防雷保护单元，改进元器件布置、安装位置和接地方式等，条件允许的情况下，装置尽量放置在牵引变电所防雷针保护的范围内。**EA**

(收稿日期：2020.01.09)

(编辑：朱金凤)

(上接第45页)

次。为便于比较，海上风电场25年运行期间主变压器按检修一次考虑。

陆上220kV电压等级变压器可用系数为99.887%，每年变压器故障停运时间为 $T=8\,760\times(1-99.887\%)=9.9\text{ h}$ 。按每年变压器故障停运时间10 h计，则25年运行期间，主变压器故障停运时间约为250 h。考虑到海上升压站变压器的运维和修理难度较大，故障停运时间可能有较大增加，本报告按750 h计。

考虑变压器在25年运行期间需进行一次长时间的检修，按照4.2 MW的功率曲线计算风场出力。

当风速高于25 m/s时，风机处于停机状态。经计算，在风速在8 m/s以下时，风电场输出功率小于200 MW，当主变压器故障发生在风速在8m/s以下时，两种主变压器方案输出容量均为风力发电机组发出的全部电量。

当风速为8.5~25 m/s 时，风电场输出功率大于240 MW，此时200 MV·A主变压器输出功率为200 MW，240 MV·A主变压器输出功率为240 MW。

当风速为8~8.5m/s时，风电场输出功率在200~240 MW，此时200 MV·A主变压器输出功率为200 MW，240 MV·A主变压器输出功率为风电场输出功率。

根据风电场代表年风速频率统计，当主变压器故障发生在风速8~25 m/s 阶段时，若选用200 MV·A主变压器相比240 MV·A主变压器电量损失如表5所示。

表5 风电场损失电量统计表

风速/(m/s)	损失功率/MW	停运时间/h	损失费用/万元
8~8.5	20	38.25	65.02
8.5~25	40	228.75	777.75

注：1. 风速为8~8.5 m/s 时，风电场输出功率为风速段平均功率。
 2. 停运时间为 $750\text{ h}\times 5.1\%=38.25\text{ h}$ ， $750\text{ h}\times 30.5\%=228.75\text{ h}$ 。
 3. 电价按照现行上网电价0.85元/kW·h计算。

3. 小结

变压器投资、损耗和故障时停运电量损失经济性比较如表6所示。

表6 综合经济性比较表

项目	200 MV·A	240 MV·A
设备数量/台	2	2
设备造价/万元	1 540	1 730
主变压器电能损耗/万元	3 568	3 291
发电量相对损失/万元	843	0
可比投资/万元	930	0

通过上述分析，海上升压站设置2台主变压器，每台主变压器容量设置20%的冗余经济性更好。

结束语

一般情况下当整个风电场的容量为200 MW 时，可采用双绕组变压器或低压侧双分裂绕组变压器；大于300 MW时，推荐采用低压侧双分裂绕组变压器。对于主变压器容量和台数的选择，小于150 MW时，可仅设置一台主变压器；当整个风电场的容量大于150 MW但小于500 MW时，可设置2台主变压器，每台变压器容量设置20%的冗余；大于500 MW时，需设置3台及以上的主变压器，变压器容量可不考虑冗余。**EA**

(收稿日期：2019.12.30)

(编辑：朱金凤)