[路由器]

电能路由器的可靠性分析

文/上海电机学院　翟静璇　张海燕

电能路由器关系着未来能源互联网的安全可靠运行，以常见的电能路由器拓扑为基础，从模块可靠性出发，研究了电能路由器的端口可靠性，为以后研究分析使用多端口电能路由器的供电系统可靠性提供依据和方向。

电能路由器是一种基于现代电力电子技术设计的系统能量交换装置，具有信息与电力潮流集成度高、准确、连续和快速的特点，可为新能源发电装置和负载提供灵活多样化的接口，还可通过灵活的控制手段实现能量的多向流动能力和对功率流的主动控制。将电能路由器运用于数据中心供电系统中，既可以消纳部分新能源，也可以减少配用电过程中交直流转化的中间环节，对于环境保护及数据中心的节能都有重要意义。

电能路由器还处于尚未投入实际应用的阶段，本文以分析电能路由器的可靠性为目标展开研究，对于电能路由器研究与发展有着不可忽视的意义。

电能路由器结构

电能路由器的功率模块由电力电子变压器（PET）演变而来。而PET由电力电子变换器和高频变压器组成，用于实现电气量变换、能量传递以及系统隔离等功能。将两端口的电力电子变压器稍加改造，成为四端口的电力电子变压器，再根据内部控制和上层调度，就可以实现电能的路由功能。

目前研制成功的电力电子变压器样机在高压侧大多采用级联型H桥或矩阵变换器。为满足大功率应用场合的需求，一般需要三相电力电子变压器。

级联型电力电子变压器内部具有四个电压等级，同时配置三个端口，四个电压等级分别为：AC10 kV、DC10 kV、DC375 V和AC380 V；三个端口分别连接10 kV交流母线及进线，10 kV直流母线及出线和380 V交流母线及出线。375 V直流电压等级用于实现其他电压等级的相互变换，10 kV交流电压各相都配置独立的变换模块与375 V直流电压的连接，变换模块采用多层结构，每层子模块由单相逆变器与DAB模块构成，其中单相逆变器交流侧串联连接而DAB模块低压直流侧并联连接；10 kV直流电压通过多层DAB模块实现与375 V直流电压的连接，其中DAB模块中压直流侧并联连接而低压直流侧并联连接；380 V交流电压通过三相逆变器实现375 V直流电压的连接。

模块的可靠性

电能路由器由H桥模块、DAB模块和三相四桥臂DC/AC模块组成。本文对模块的可靠性进行分析计算，从而分析出电能路由器的可靠性。

DAB模块的拓扑结构如图1所示。

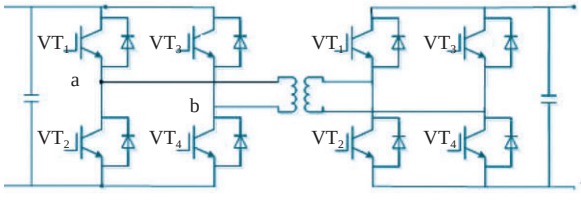

图1　DAB拓扑

DAB的可靠性模型由6个部分串联组成：①单相桥式全控逆变电路（DC/AC）；②变压器一次串联电感（L）；③高频变压器（T）；④单相桥

式整流电路（AC/DC）；⑤滤波电容（C）；⑥控制保护（C&P），如图2所示。

图2　DAB可靠性框图

各元件的故障率参数见表1。

表1　DAB元件故障率参数

元件	故障率/（次/a）
DC/AC	0.020 83.0
L	0.000 084
T	0.013 928
AC/DC	0.053 962
C	0.022 776
C&P	0.251 430

由串联模型的可靠性计算公式，得出λ_{DAB}=0.363 01。

发生故障后，可以采用元件修复或更换备用件来消除故障保证设备正常工作，现有条件下DAB的修复时间难以估计，但可用近似电压等级的交流变压器的更换备用时间作为其更换备用时间，备用更换时间为10 h。

三相四桥臂DC/AC模块的拓扑结构如图3所示。

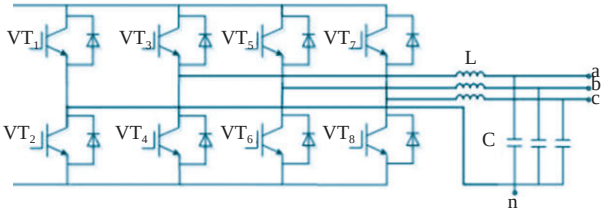

图3　DC/AC模块拓扑

三相四桥臂DC/AC模块的可靠性模型由3个部分串联组成：①逆变桥臂；②滤波电感（L）；③滤波电容（C）。如图4所示。

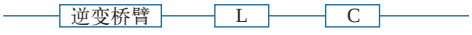

图4　DC/AC模块可靠性框图

各元件的故障率参数如表2所示。

表2　DC/AC模块元件故障率参数

元件	故障率/（次/a）
逆变桥臂	0.000 2614
L	0.000 11.0
C	0.000 308

由串联模型的可靠性计算公式得出$\lambda_{DC/AC}$=0.002 299 6。

发生故障后，DC/AC模块备用更换时间为26 h。

电能路由器可靠性

建立级联型电能路由器可靠性模型如图5所示。E1－1为多层AC/DC串联DAB部分，E1－2为DC/AC模块部分，E1－3为多层DAB部分。

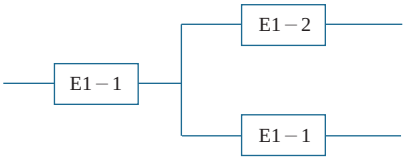

图5　级联型电能路由器可靠性框图

（1）AC10 kV端口

AC10 kV端口包括AC/DC模块和DAB模块，结构如图6所示。

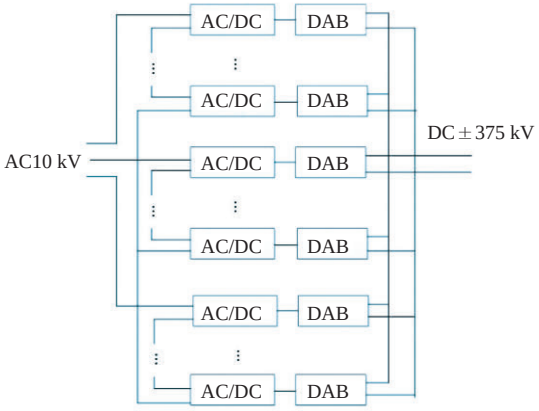

图6　级联型AC10 kV端口

其中，子模块包括一个AC/DC模块和一个DAB模块串联，故障率为

$$\lambda_{sub}=\lambda_{AC/DC}+\lambda_{DAB}=0.416\ 972\text{（次/a）}$$

对于10 kV交流端口，单相输入电压有效值为5 774 V，峰值为8 165 V，最高峰值为8 737 V，选取高压侧直流电压为9 000 V，选取低压侧直流电压为350 V。考虑到线路与器件内部杂散电感会在关断时引起电压尖峰，IGBT耐压应为直流侧电压1.5～2.5倍，因此高压侧IGBT总耐压选为16 kV。IGBT均采用3 300 V的器件、每个功率单元（H桥或DAB模块）的额定电压在1 600 V左右、不考虑冗余配置。

取子模块数量为10个，不考虑冗余配置。则AC10 kV端口共有30个子模块，其故障率为：

考虑极端情况，至少需要更换一个子模块设备才能恢复工作，则修复时间为$r_{1-10\ kV\ AC}$=16 h。

（2）AC380 V端口

由图7可知，低压交流端口故障率等于DC/AC变换器的故障率

图7　级联型AC380V端口

修复时间DC/AC修复时间，为26 h，故

$$r_{1-380\ V\ AC}=26\ h$$

（3）DC10 kV端口

如图8所示，分析方法与高压交流端口相同，不考虑冗余配置，仍需要10个DAB模块。其故障率为$r_{1-10\,kV\,DC}=0.363\,01$（次/a）。

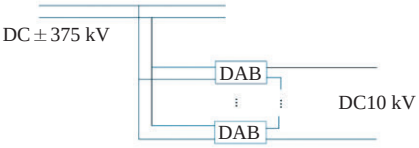

图8　级联型10 kV DC端口

修复时间取为DAB更换备用时间10 h，即$r_{1-10\,kV\,DC}=10$ h。级联型端口可靠性参数如下表所示。

表　级联型端口可靠性参数

端口	故障率/（次/a）	修复时间/h	故障概率
AC10 kV	12.509 16	16	2.28×10^{-2}
DC10 kV	3.630 1	10	4.14×10^{-3}
AC380 V	0.002 299 6	26	6.83×10^{-6}

结束语

本文简单介绍了一种高压侧采用级联型H桥的电能路由器的结构，因其各端口结构功能相对独立，因此，通过分析其包含的模块的可靠性，从端口的角度分析了电能路由器的可靠性。本文对于研究使用电能路由器的供电系统的可靠性有着重要的意义。当电能路由器在供电系统中工作时，若某个端口发生故障，其余端口仍可正常工作，因此，可以从端口的角度分析供电系统中供电电源到输出端的所有路径，从而分析计算供电系统的可靠性。EA

（收稿日期：2018.09.30）
（编辑：朱金凤）

（上接第56页）

触指侧和极柱侧，即热缩套长度要长于原有触臂绝缘罩的两端，增加电气爬电距离。

2）设计上，在12 kV真空断路器的触臂和极柱间增加密封件，阻断真空断路器对开关柜主安装板触头盒孔的放电路径。

3）设计上，优化12 kV真空断路器的触臂绝缘罩形状，采用伞裙设计以增加爬电距离，消除真空断路器触指侧对开关柜主安装板触头盒孔的放电路径。试验表明，伞裙设计可提供4～6 kV工频耐压。

开关柜改进措施

1）现场应去除金属零件上的毛刺，尤其是开关柜主安装板触头盒安装孔要保证无毛刺。现有主安装板的加工工艺有激光切割和模具冲孔，激光切割的精度高且毛刺少，模具冲孔精度低且毛刺多，如图4所示。如果采用模具冲孔加工主安装板，建议追加去除毛刺工序。

2）投入运行前，要清洁触头盒，尽量做到无油污和少灰尘。触头盒清洁度直接影响共绝缘性能。

3）在开关柜主安装板触头盒安装孔的金属缝填充玻璃胶，不留空隙，用绝缘性能较高的玻璃胶取代绝缘性能低的空气。在同样电场条件下，高绝缘性能的玻璃胶不会产生击穿现象，在空气中则会产生击穿问题。

4）触头盒直径采用常规的108 mm，且增加内裙边设计，增大空气净距和爬电距离，提高断路器配柜的绝缘性能。

5）采用整体式触头盒设计，减少开关柜主安装板开孔。且触头盒安装孔的金属缝隙要远离断路器触臂，增大空气爬距，提高断路器配柜的绝缘性能。

现场的情况复杂多变，在验证12 kV真空断路器配合开关柜的工频耐压试验时，同时要根据GB/T 16927.1—2011和GB/T 1984—2014规定的大气标准条件下计算大气修正系数以及海拔的影响，调整工频耐压试验数值。通常，当相对湿度大于80%时，破坏性放电会变得不规则，特别是当破坏性放电发生在绝缘表面时，所以不建议在相对湿度大于80%时验证工频耐压试验。EA

（收稿日期：2018.11.25）
（编辑：朱金凤）