

基于器件结温的同相补偿变流器可靠性评估

刘 飞¹, 解绍锋¹, 侯东光¹, 周 婷¹, 张晓芳²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司运营分公司, 浙江 温州 325000)

摘要: 以 5 MW 模块化同相补偿变流器为例, 基于同相补偿变流器的相关电热参数, 建立变流器整流侧和逆变侧 IGBT 模块的结温仿真模型, 分析同相补偿变流器在额定工况时的损耗和结温。结合实测的高速铁路和重载铁路牵引负荷数据, 利用 Bayerer 模型和线性疲劳累积损伤理论评估全时补偿和需时补偿下同相补偿变流器的可靠性。研究表明, 由于高速铁路和重载铁路 2 种牵引负荷波动程度的不同, 重载铁路全时补偿和需时补偿下变流器故障率的差异远低于高速铁路全时补偿和需时补偿下变流器故障率的差异。同时针对重载铁路负荷, 提出了一种新的能提高同相补偿变流器可靠性的运行方式。

关键词: 组合式同相供电; 同相补偿变流器; 结温; 可靠性评估; 运行方式

中图分类号: U224.8; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.022

0 引言

随着我国高速、重载铁路运营里程的不断增长, 电气化铁路过分相以及负序、谐波等电能质量问题日益突出, 无分相的同相供电系统是解决这些问题的理想方案。近年来, 在眉山同相供电方案基础上发展起来的组合式同相供电使牵引供电和负序补偿在结构上相互独立、在功能上相互组合, 其实现方法是在单相变压器的基础上应用以负序补偿为中心的补偿方案, 同相补偿装置的容量结合实际情况设定^[1-3]。组合式同相供电分为单相组合式同相供电和单三相组合式同相供电 2 种方案, 2 种方案的供电示意图详见文献[1]。

作为同相补偿装置的核心组件, 同相补偿变流器的性能优劣对组合式同相供电系统的可靠运行有着重要影响。同相补偿变流器是电能转换系统中薄弱环节之一, 为了降低系统维护维修成本, 迫切需要对同相补偿变流器进行可靠性分析, 进一步提出相应的维护维修策略, 确保同相补偿变流器高可靠性地稳定运行。现有文献主要是利用电子设备可靠性评估手册 MIL-HDBK-217F 和 GJB/Z299C 评估同相补偿变流器在一种工作状态下的可靠性, 而这些手册评估过程中仅关注恒定负荷下的结温对器件可靠性的影

响, 忽略了结温波动的影响。功率变流器中器件失效与器件承受的电热应力有很大关系, 功率变流器中超过 50% 的故障是由 IGBT 模块的疲劳失效引起的^[4]。牵引负荷的剧烈波动使功率器件的损耗产生波动, 进而引起器件的结温也产生波动, 而功率器件失效的速度主要由器件结温的均值及波动幅值决定^[5]。

本文首先给出了功率器件的可靠性评估模型及可靠性评估流程图, 然后以同相补偿变流器采用背靠背式 15 级级联结构为例, 建立整流侧和逆变侧 IGBT 模块结温仿真模型, 并分析牵引负荷波动对同相补偿变流器损耗和结温的影响; 接着, 根据结温波动数据, 利用雨流算法提取相应的温度循环次数; 最后, 利用 Bayerer 模型和线性疲劳累积理论评估在不同负荷特征参数和不同运行方式下同相补偿变流器的可靠性。

1 可靠性评估模型及流程图

1.1 可靠性评估模型

由于 IGBT 模块各层材料的热膨胀系数存在差异, 当模块的温度产生变化时, 会在不同材料上产生不同的热膨胀力, 导致模块材料产生疲劳老化。IGBT 模块疲劳老化的主要形式是焊料层脱落和铝键合线(绑定线)断裂^[6]。

LESIT 研究机构通过对不同芯片制造商的 IGBT 模块进行大量的加速老化实验, 揭示了功率循环失效周期数 N_f 与结温变化的均值 T_m 及结温波动的幅值 ΔT_j 之间的关系, 如图 1 所示^[6]。

从图 1 中可以看出, 相对于结温变化的均值 T_m , 结温变化波动的幅值 ΔT_j 对 IGBT 模块寿命的影响更加明显。文献[7]采用了 Bayerer 解析寿命模型:

$$N_f = k (T_{jmax} - T_{jmin})^{\beta_1} e^{\frac{\beta_2}{T_{jmin} + 273}} t_{on}^{\beta_3} I^{\beta_4} U^{\beta_5} D^{\beta_6} \quad (1)$$

收稿日期: 2016-09-03; 修回日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307143); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2682015ZD03); 中国铁路总公司重点科技项目(2015J005-A); 广州地铁设计研究院有限公司项目

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307143), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2682015ZD03), the Key Science and Technology Project of China Railway Corporation(2015J005-A) and the Project of Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd.

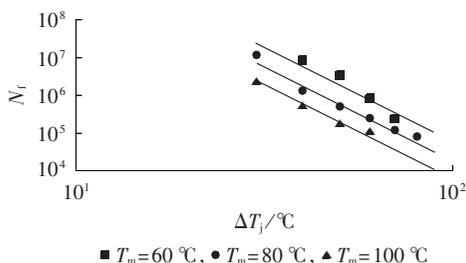


图 1 功率循环失效周期数与结温关系

Fig.1 Relationship between number of power cycles to failure and junction temperature

其中, t_{on} 为加热时间; I 为每个铝键合线流过电流的有效值; U 为功率模块电压; D 为铝键合线的直径; T_{jmax} 、 T_{jmin} 分别为一个波动周期内结温的最大值和最小值; $k=9.3 \times 10^{14}$, $\beta_1=-4.416$, $\beta_2=1285$, $\beta_3=-0.463$, $\beta_4=-0.716$, $\beta_5=-0.761$, $\beta_6=-0.5$ 。

为了预测实际牵引负荷下功率器件的可靠性, 文献[8-9]利用线性疲劳累积损伤模型(Miner 模型), 给出了如式(2)所示的变流器失效率计算公式:

$$\lambda = \sum_{n=1}^N \frac{N_n}{N_{f,n}} \quad (2)$$

其中, $N_{f,n}$ 为第 n 次情况下结温所对应的额定循环失效周期数; N_n 为实际情况下的结温循环次数。

1.2 损耗计算和结温计算

损耗和结温计算原理详见文献[10-11]。本文用 Foster 网络建立功率器件的热模型, 整流侧功率器件选用西门康型号为 SKIIP1513GB172-3DL-V3 的 IGBT 模组, 逆变侧选用西门康型号为 SKIIP2403GB172-4DL-V3 的 IGBT 模组。表 1 和表 2 为 IGBT 模块具

表 1 西门康 SKIIP1513GB172-3DL-V3 模块热网络的相关参数

Table 1 Parameters of heat network of SKIIP1513GB172-3DL-V3 module

参数	数值			
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
$R_{(js)IGBT}/(mK \cdot W^{-1})$	3.4	9.6	7	0
$\tau_{(js)IGBT}/s$	363	0.18	0.04	1
$R_{(js)D}/(mK \cdot W^{-1})$	12	12	18	20
$\tau_{(js)D}/s$	30	5	0.25	0.04
$R_{sa}/(mK \cdot W^{-1})$	2.1	20	5.5	1.4
τ_{sa}/s	210	85	11	0.4

表 2 西门康 SKIIP2403GB172-4DL-V3 模块热网络的相关参数

Table 2 Parameters of heat network of SKIIP2403GB172-4DL-V3 module

参数	数值			
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
$R_{(js)IGBT}/(mK \cdot W^{-1})$	1.2	5	5.8	0
$\tau_{(js)IGBT}/s$	69	0.35	0.02	1
$R_{(js)D}/(mK \cdot W^{-1})$	2	3	13.5	13.5
$\tau_{(js)D}/s$	50	5	0.25	0.04
$R_{sa}/(mK \cdot W^{-1})$	2.7	24.6	1.1	0.6
τ_{sa}/s	48	15	28	0.4

体的热阻抗参数(模块的热阻可等效为四阶模型)。表中, $R_{(js)}$ 为芯片结到散热器的热阻; $\tau_{(js)}$ 为芯片结到散热器热阻的时间常数; 下标 IGBT 和 D 分别对应 IGBT 和二极管的参数; R_{sa} 为散热器到环境的热阻; τ_{sa} 为散热器到环境热阻的时间常数。

1.3 可靠性评估流程图

结合上述分析, 同相补偿变流器的可靠性评估流程如图 2 所示。首先由变流器的电热参数、实际的牵引负荷计算 IGBT 模块的损耗和结温; 然后将器件失效率的计算分为基频尺度失效率的计算和低频尺度失效率的计算。基频尺度指同相补偿变流器的输出频率, 为 50 Hz; 低频尺度指因为牵引负荷随机波动而产生的结温波动, 波动幅度大, 波动周期远大于基频周期。在计算基频尺度失效率时, 可直接利用 Bayerer 模型和 Miner 模型计算得到, T_m 为一个基频周期内结温最大值和最小值的平均值, ΔT_j 为一个基频周期内结温最大值与最小值的差值; 在计算低频尺度失效率时, 需要首先对基频周期结温取平均值, 然后得到低频尺度结温波动, 之后用雨流算法提取结温波动的均值 T_m 、幅值 ΔT_j 及对应的循环次数 N_n , 再用 Miner 模型得到低频结温波动对应的失效率。根据低频尺度结温波动和基频尺度结温波动对 IGBT 模块可靠性影响程度的不同, 可以分别计算评估这 2 种不同时间尺度的结温波动对 IGBT 模块失效率的影响[12-14]。功率器件失效率的具体计算方法详见参考文献[13]。

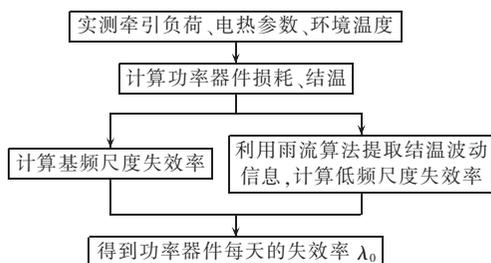


图 2 同相补偿变流器可靠性评估流程图

Fig.2 Flowchart of reliability evaluation for co-phase compensation converter

铁路行车严格按照事先制定好的列车运行图运行, 牵引负荷具有周期性, 则实测牵引负荷的周期为 1 d。由此, 可以得出 IGBT 器件每天(24 h)的失效率 λ_0 , 然后将器件每天的失效率转换为故障率 λ (单位 Fit), 转换公式如下:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{24} \times 10^9 \quad (3)$$

2 同相补偿变流器的可靠性评估

2.1 同相补偿变流器结构

图 3 为 5 MW 同相补偿变流器的结构示意图, 整

流侧输入电压为 10 kV,采用 15 级级联结构,逆变侧输出电压为 680 V,采用多绕组升压结构。同相补偿变流器的具体参数如表 3 所示。

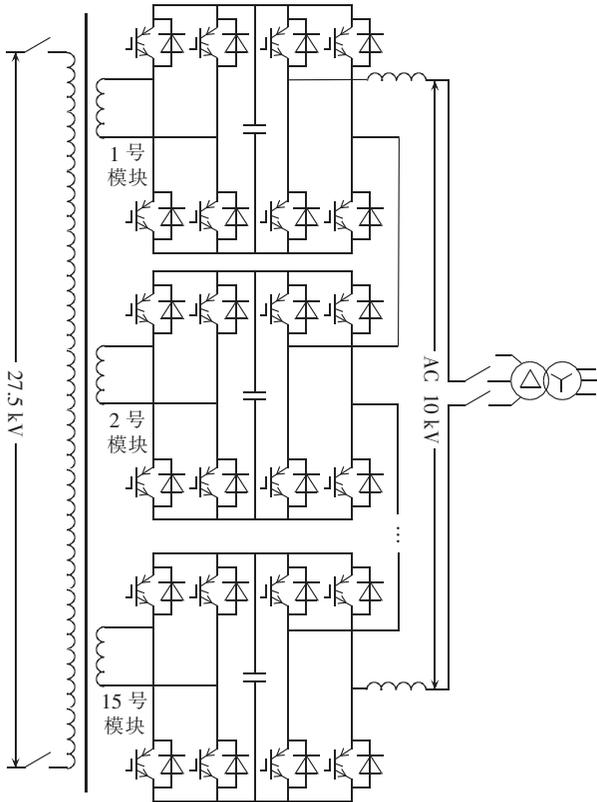


图 3 同相补偿变流器结构图

Fig.3 Structure of co-phase compensation converter

表 3 5 MW 同相补偿变流器的具体参数

Table 3 Specific parameters of 5 MW co-phase compensation converter

参数	数值	备注
额定功率/MW	5	1.1 倍过负荷能力
输入电压/kV	10	10 kV 高压链式结构
输出电压/V	680	
直流母线电压/V	1 100	
单个模块的功率/kW	367	额定值
单个模块输入电流/A	557	额定值
单个模块输出电流/A	545	额定值
整流侧开关频率/Hz	400	
逆变侧开关频率/Hz	1500	
功率因数	0.98	
变流器效率/%	98	
冷却风扇功率/kW	120	额定值

2.2 额定工况下 IGBT 模块的损耗和结温分析

首先分析同相补偿变流器 IGBT 模块在额定情况下的功率损失和结温,如表 4 所示,其中环境温度设为 40 °C。表中, T_{j-IGBT} 、 T_{j-D} 分别为达到散热平衡后 IGBT 和二极管的结温; $P_{cd,IGBT}$ 、 $P_{cd,D}$ 分别为 IGBT 和二极管的通态损耗; $P_{sw,IGBT}$ 、 $P_{sw,D}$ 分别为 IGBT 和二极管的开关损耗; P_{IGBT} 、 P_D 分别为 IGBT 和二极管的通态损耗和开关损耗之和; P_{tot} 为 IGBT 模块的总损耗。

表 4 额定工况下 IGBT 模块的功率损失和结温

Table 4 Power loss and junction temperature of IGBT module under rated condition

参数	数值		参数	数值	
	整流侧	逆变侧		整流侧	逆变侧
$P_{cd,IGBT}/W$	364	316	P_D/W	75	103
$P_{sw,IGBT}/W$	74	275	P_{tot}/W	513	694
P_{IGBT}/W	438	591	$T_{j-IGBT}/^{\circ}C$	83	88.5
$P_{cd,D}/W$	63	52	$T_{j-D}/^{\circ}C$	78	84.7
$P_{sw,D}/W$	12	51			

由表 4 可知,整流侧和逆变侧 IGBT 和二极管的通态损耗 $P_{cd,IGBT}$ 与 $P_{cd,D}$ 相差不大,两者损耗的区别主要体现在开关损耗 $P_{sw,IGBT}$ 与 $P_{sw,D}$ 上,这主要是由于逆变侧 IGBT 模块的开关频率(1500 Hz)大于整流侧的开关频率(400 Hz)。虽然逆变侧 IGBT 模块总损耗要比整流侧总损耗高 35%,但由于逆变侧 IGBT 模块的热阻小于整流侧的热阻,达到散热平衡后,逆变侧的结温只比整流侧高出约 7%。逆变侧 IGBT 模块的瞬时功率损耗和结温仿真波形分别如图 4 和图 5 所示。

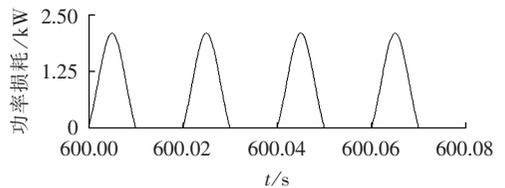


图 4 额定工况下逆变侧 IGBT 的瞬时功率损耗

Fig.4 Instantaneous power loss of inverter-side IGBT under rated condition

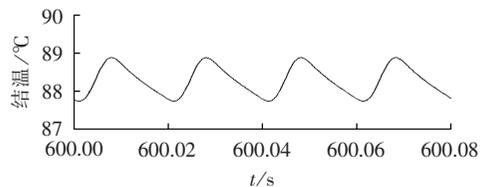


图 5 额定工况下逆变侧 IGBT 的瞬时结温

Fig.5 Instantaneous junction temperature of inverter-side IGBT under rated condition

由变流器的换流特性可知,在输出电流的前半周期,某一桥臂上 IGBT 的功耗随输出电流作近似正弦规律变化,导致结温在前半周期不断上升;在输出电流的后半周期,该 IGBT 没有电流流过,功率损耗为零,导致结温在后半周期不断下降。当结温稳定不变后,IGBT 结温波动的幅值 ΔT_j 约为 1 °C。图 6 为额定电流持续作用在变流器上的结温变化图,从图中可以看出,进入发热和散热相互平衡状态后,逆变侧 IGBT 的结温稳定在 88.5 °C。

2.3 实例分析

本文以高速铁路和重载铁路这 2 种牵引负荷为例,结合同相补偿装置的运行方式(全时补偿、需时补偿),分析不同特征参数的牵引负荷对同相补偿变

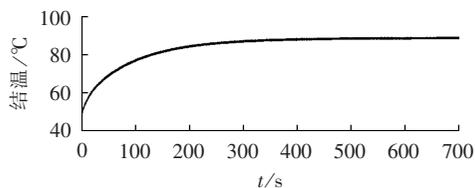


图 6 额定工况下逆变侧 IGBT 的结温变化

Fig.6 Junction temperature variation of inverter-side IGBT under rated condition

流器可靠性的影响。全时补偿指同相补偿装置持续运行,分担牵引负荷的一半但不超过变流器的额定容量;需时补偿指只有当负序超过国标允许值时,同相补偿装置才投入运行,补偿负荷功率与负序允许功率差值的 $1/2$ [15]。针对重载铁路负荷,为了使同相补偿变流器的负荷过程更加平稳,提出一种新的同相补偿装置运行方式,此种运行方式能够有效提高同相补偿变流器的可靠性,具体分析说明详见 2.3.3 节。

2.3.1 高速铁路牵引负荷对同相补偿变流器可靠性的影响

图 7 为我国高速铁路某牵引变电所全天负荷过程图,对实测数据进行统计分析可知,实测负荷电流 95% 概率大值 $I_{95\%}=910$ A,最大值 $I_{\max}=2124$ A。假定该牵引变电所系统短路容量 $S_d=1400$ MV·A,则 95% 概率大值负序功率允许值 $S_{s95\%}=18.2$ MV·A,最大负序功率允许值 $S_{\max}=36.4$ MV·A。对该牵引变电所进行组合式同相供电改造,采用单三相组合式同相供电方案,则牵引变压器的容量 $S_T=40$ MV·A,同相补偿变流器的容量 $S_C=10$ MV·A,具体设计方法详见文献[15]。下面以逆变侧 IGBT 为例进行分析。图 8 为全时补偿、需时补偿下逆变侧 IGBT 的结温波动图。图 9 为 IGBT 的温度循环次数及故障率分布图。由 Bayerer 模型可以计算出图 9(a)所示的结温均值 T_m 及幅值 ΔT_j 对应的额定功率循环次数 $N_{f,m}$,然后由式(2)Miner 模型计算失效率,接着由转换公式(3)将失效率转换为故障率,见图 9(b)。高速铁路需时补偿及重载铁路全时、需时补偿下低频温度循环次数及故障率分布图不再给出。

由图 9 可以看出,温度循环次数较多的小幅值结温波动所引起的故障率较小,IGBT 模块因低频结温波动而引起的故障率主要分布在大幅值结温波动

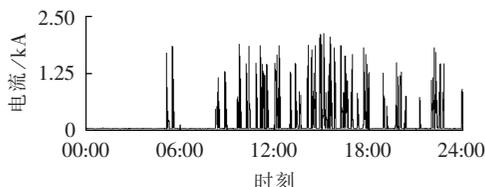
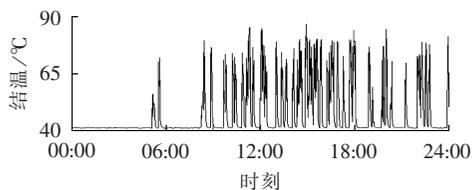
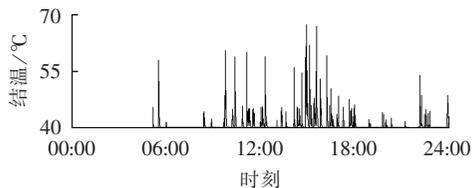


图 7 高速铁路某牵引变电所全天负荷过程图

Fig.7 Load process diagram of a traction substation in high-speed railway

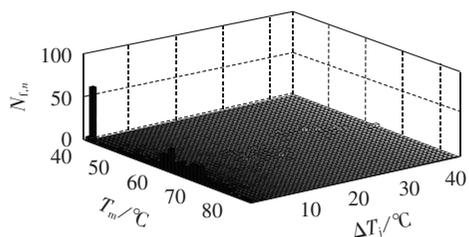


(a) 全时补偿

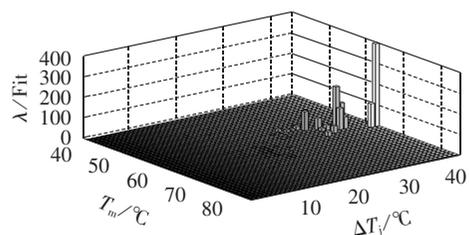


(b) 需时补偿

图 8 全时补偿和需时补偿下逆变侧 IGBT 的结温
Fig.8 Junction temperature of inverter-side IGBT under full time compensation and required time compensation



(a) 逆变侧 IGBT 的温度循环次数图



(b) 逆变侧 IGBT 的故障率分布图

图 9 全时补偿下逆变侧 IGBT 的温度循环次数及故障率分布图

Fig.9 Number of temperature cycles of inverter-side IGBT and failure rate distribution under full time compensation

的区域,其温度循环次数相对较少,因此 IGBT 模块的故障率与温度循环次数是不对等的。低频结温波动分布广泛,这主要与牵引负荷的随机波动相关,且 IGBT 模块的故障率主要是由大幅值的结温波动引起的,因此降低这种大幅值的结温波动,可以降低变流器的故障率。

全时补偿和需时补偿下的故障率计算结果分别如表 5 和表 6 所示。由表 5 可知,低频结温波动引起的故障率远大于基频结温波动引起的故障率,这主要是由于低频结温波动的幅值远大于基频结温波动的幅值。与结温波动的均值相比,结温波动的幅值对 IGBT 的故障率影响更大。

对比表 5 和表 6 可知,当同相补偿变流器应用在

表 5 全时补偿下故障率计算结果

Table 5 Calculation results of failure rate under full time compensation

器件	基频尺度故障率	低频尺度故障率	器件总的故障率
整流侧 IGBT	5	873	878
整流侧二极管	0	540	540
逆变侧 IGBT	6	1385	1391
逆变侧二极管	0	915	915
单个模块	11	3713	3724

表 6 需时补偿下故障率计算结果

Table 6 Calculation results of failure rate under required time compensation

器件	基频尺度故障率	低频尺度故障率	器件总的故障率
整流侧 IGBT	1	11	12
整流侧二极管	0	6	6
逆变侧 IGBT	1	15	16
逆变侧二极管	0	9	9
单个模块	2	41	43

高速铁路时,全时补偿下变流器的故障率远大于需时补偿下变流器的故障率,结合图 8 可知,这主要是由于全时补偿下 IGBT 大幅值结温波动次数要比需时补偿下 IGBT 大幅值结温波动次数多。高速铁路负荷波动剧烈(尖峰多),如果同相补偿装置运行在全时补偿下,则同相补偿变流器的可靠性问题应得到足够的重视;而同相补偿变流器运行在需时补偿下能够有效降低其故障率。

2.3.2 重载铁路牵引负荷对同相补偿变流器可靠性的影响

图 10 为我国重载铁路某牵引变电所全天负荷过程图,对实测数据进行统计分析可知,实测负荷电流 95% 概率大值 $I_{95\%}=1018\text{ A}$,最大值 $I_{\max}=1348\text{ A}$ 。假定该牵引变电所系统短路容量 $S_d=800\text{ MV}\cdot\text{A}$,则 95% 概率大值负序功率允许值 $S_{e95\%}=10.4\text{ MV}\cdot\text{A}$,最大负序功率允许值 $S_{\max}=20.8\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。对该牵引变电所进行组合式同相供电改造,采用单三相组合式同相供电方案,则牵引变压器的容量 $S_T=20\text{ MV}\cdot\text{A}$,同相补偿变流器的容量 $S_C=10\text{ MV}\cdot\text{A}$,具体设计方法详见文献[15]。

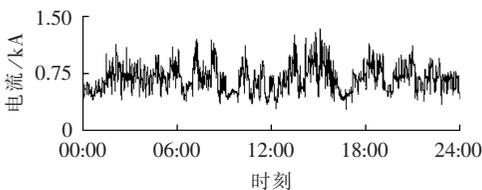
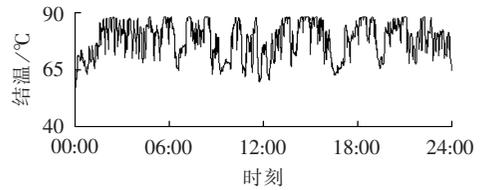


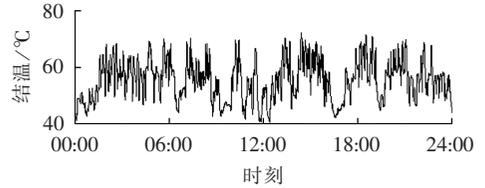
图 10 重载铁路某牵引变电所全天负荷过程图

Fig.10 Load process diagram of a traction substation in heavy-haul railway

全时补偿和需时补偿下逆变侧 IGBT 的结温如图 11 所示,故障率计算结果分别如表 7 和表 8 所示。



(a) 全时补偿



(b) 需时补偿

图 11 全时补偿和需时补偿下逆变侧 IGBT 的结温

Fig.11 Junction temperature of inverter-side IGBT under full time compensation and required time compensation

表 7 全时补偿下故障率计算结果

Table 7 Calculation results of failure rate under full time compensation

器件	基频尺度故障率	低频尺度故障率	器件总的故障率
整流侧 IGBT	6	121	127
整流侧二极管	0	76	76
逆变侧 IGBT	12	218	230
逆变侧二极管	0	139	139
单个模块	18	554	572

表 8 需时补偿下故障率计算结果

Table 8 Calculation results of failure rate under required time compensation

器件	基频尺度故障率	低频尺度故障率	器件总的故障率
整流侧 IGBT	3	93	96
整流侧二极管	0	56	56
逆变侧 IGBT	7	184	191
逆变侧二极管	0	117	117
单个模块	10	450	460

对比表 7 和表 8 可知,当同相补偿变流器应用在重载铁路时,全时补偿下变流器的故障率高于需时补偿下变流器的故障率;对比表 7、8 与表 5、6 可知,重载铁路全时补偿和需时补偿下变流器故障率的差异远小于高速铁路全时补偿和需时补偿下变流器故障率的差异,主要原因是两者牵引负荷波动程度不同。

2.3.3 一种新的同相补偿装置运行方式

由 2.3.2 节可知,本文的重载铁路全天负荷过程相对高速铁路比较平稳,且此重载线路列车发车比较紧密,牵引变电所无空载运行时刻;需时补偿下逆变侧 IGBT 的结温波动仍然比较明显;高速铁路需时补偿下的故障率远低于全时补偿,而重载铁路负荷需时补偿下故障率下降不够显著。基于上述分析,为了提高同相补偿变流器的可靠性,提出同相补偿装置的第 3 种运行方式,具体如图 12 所示。图中, S_T 为

牵引变压器分担的功率; S_C 为同相补偿装置分担的功率; S_{al} 为电力系统允许的负序功率值; S_{CN} 为同相补偿装置的额定功率。

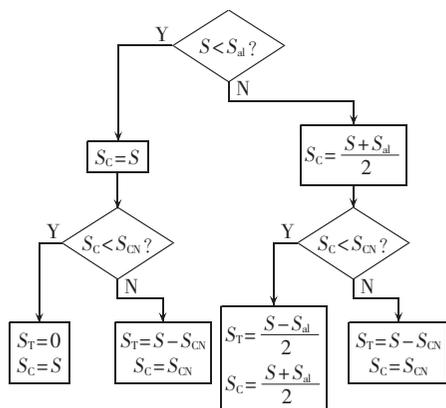


图 12 同相补偿装置的第 3 种运行方式
Fig.12 Third operating mode of co-phase compensation device

在第 3 种运行方式下,当牵引负荷小于电力系统负序功率允许值且不超过同相补偿装置额定容量时,牵引变压器不投入,处于热备用,同相补偿装置承担全部功率,否则同相补偿装置按额定功率输出,牵引变压器分担剩余功率;当牵引负荷大于负序功率允许值且同相补偿装置分担的功率小于其额定容量时,牵引变压器分担牵引负荷和负序功率允许差值的一半,同相补偿装置分担牵引负荷和负序功率允许和值的一半,否则同相补偿装置按额定功率输出,牵引变压器分担剩余功率。图 13、图 14 分别为该方式下逆变侧 IGBT 的功率损耗和结温波动图。

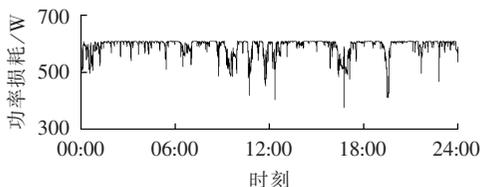


图 13 第 3 种运行方式下逆变侧 IGBT 的功率损耗
Fig.13 Power loss of inverter-side IGBT under third operating mode

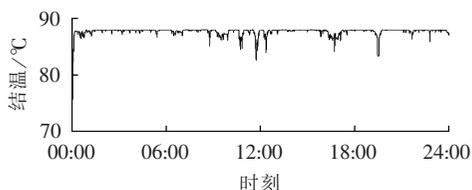


图 14 第 3 种运行方式下逆变侧 IGBT 的结温
Fig.14 Junction temperature of inverter-side IGBT under third operating mode

表 9 为第 3 种运行方式下故障率计算结果。

重载负荷下,针对单个模块,全时补偿、需时补偿和第 3 种运行方式的故障率分别为 573 Fit、460 Fit

表 9 第 3 种运行方式下故障率计算结果

Table 9 Calculation results of failure rate under third operation mode

器件	故障率		Fit
	基频尺度	低频尺度	
整流侧 IGBT	8	0.1	8.1
整流侧二极管	0	0	0
逆变侧 IGBT	13	0.2	13.2
逆变侧二极管	0	0.1	0.1
单个模块	21	0.4	21.4

和 21.4 Fit,可见第 3 种运行方式下的故障率最小。当牵引负荷较小时同相补偿变流器承担全部的负荷,当牵引负荷较大时变流器按额定功率输出,第 3 种运行方式能够使同相补偿变流器的负荷过程更加平稳,减少 IGBT 模块大幅值结温波动的次数,能够有效提高同相补偿变流器的可靠性。

3 结论

本文主要基于器件结温的可靠性分析方法,研究结温均值和结温波动幅度对变流器可靠性的影响。以 5 MW 同相补偿变流器为例,利用可靠性评估模型评估在不同负荷特征参数和不同运行方式下同相补偿变流器的可靠性,主要结论如下:

a. 低频结温波动的故障率远大于基频结温波动的故障率;

b. 高速铁路负荷短时波动剧烈,同相补偿变流器运行在全时补偿下的故障率远大于需时补偿,因此同相补偿装置运行在全时补偿下的可靠性问题应得到足够的重视;

c. 对于本文分析的高速、重载负荷,全时补偿下的故障率均大于需时补偿,但高速铁路全时补偿下的故障率远大于需时补偿,造成两者结果差异的主要原因是负荷波动程度的不同;

d. 针对本文的重载铁路负荷,提出一种新的同相补偿装置运行方式,此种运行方式能够有效提高同相补偿变流器的可靠性;

e. 根据牵引变电所负荷特性,合理选择同相补偿装置的运行方式能够降低变流器的故障率,延长同相补偿变流器的使用寿命。

本文的模型和结论能够评估实测牵引负荷下器件产生的故障率,为进一步研究同相补偿变流器的维修维护策略提供了相应的理论依据。

参考文献:

- [1] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.
- LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [2] 张刚毅, 李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转

- 换[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):142-145.
- ZHANG Gangyi,LI Qunzhan. Transfer from out-phase power supply to in-phase power supply[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):142-145.
- [3] XU H,XIE S F,ZHAO W L. An effective optimization of reliability of co-phase power supply device[C]//PIERS Proceedings. Guangzhou, China; [s.n.],2014:146-150.
- [4] YANG S,BRYANT A,MAWBY P,et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2009,47(3):3151-3157.
- [5] BAYERER R,HERRMANN T,LICHT T,et al. Model for power cycling lifetime of IGBT Modules-various factors influencing lifetime[C]//International Conference on Integrated Power Systems. Nuremberg, Germany: VDE,2011:1-6.
- [6] 赛米控国际公司. 功率半导体应用手册[EB/OL]. 2版. [2016-09-01]. <https://www.semikron.com/zh/service-support/application-manual.html>.
- [7] 周维维,吴军科,杜雄,等. 功率变流器的可靠性研究现状及展望[J]. 电源学报,2013(1):1-15.
- ZHOU Luwei,WU Junke,DU Xiong,et al. Status and outlook of power converter's reliability research[J]. IEEE Journal of Power Supply,2013(1):1-15.
- [8] D'ARCO S,UNDELAND T M,BOHLLÄNDER M,et al. A simplified algorithm for predicting power cycling lifetime in direct drive wind power systems[C]//International Multi-Conference on Systems,Signals and Devices. Chemnitz,Germany:IEEE,2012:1-6.
- [9] XIE K,JIANG Z,LI W. Effect of wind speed on wind turbine power converter reliability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(1):96-104.
- [10] 李辉,季海婷,秦星,等. 考虑运行功率变化影响的风电变流器可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(5):1-8.
- LI Hui,JI Haiting,QIN Xing,et al. Reliability evaluation considering operational active power variation of wind power converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(5):1-8.
- [11] 杨珍贵,周维维,杜雄,等. 基于器件的结温变化评估风机中参数差异对网侧变流器可靠性的影响[J]. 中国电机工程学报,2013,33(30):41-49.
- YANG Zhengui,ZHOU Luwei,DU Xiong,et al. Effects of different parameters on reliability of grid-side converters based on varied junction temperature of devices in wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(30):41-49.
- [12] 李辉,秦星,刘盛权,等. 双馈风电变流器 IGBT 模块功率循环能力评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(1):6-12.
- LI Hui,QIN Xing,LIU Shengquan,et al. Assessment of power cycling capability for converter IGBT module of DFIG system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(1):6-12.
- [13] 杨珍贵,周维维,杜雄,等. 风速记录差异对评估风电变流器可靠性的影响[J]. 电网技术,2013,37(9):2566-2572.
- YANG Zhengui,ZHOU Luwei,DU Xiong,et al. Effect of different records of wind speed on reliability evaluation of wind power converter[J]. Power System Technology,2013,37(9):2566-2572.
- [14] 杜雄,李高显,李腾飞,等. 风电变流器 IGBT 模块的多时间尺度寿命评估[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6152-6161.
- DU Xiong,LI Gaoxian,LI Tengfei,et al. Multi-time scale lifetime evaluation of IGBT modules in the wind power converter[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(23):6152-6161.
- [15] 尚国旭. 新建高速铁路同相供电方案研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
- SHANG Guoxu. Research on the scheme of co-phase power supply system in newly built high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2015.

作者简介:



刘 飞

刘 飞(1993—),男,河南南阳人,硕士研究生,研究方向为同相供电可靠性评估(E-mail:tustliuwei@126.com);

解绍锋(1976—),男,河北定州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为牵引供电系统分析和电能质量(E-mail:sfxie@swjtu.cn)。

Reliability evaluation of co-phase compensation converter based on junction temperature of devices

LIU Fei¹,XIE Shaofeng¹,HOU Dongguang¹,ZHOU Ting¹,ZHANG Xiaofang²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Wenzhou Mass Transit Railway Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, China)

Abstract: Taking the 5 MW modular co-phase compensation converter as an example, the simulation model of the junction temperature of the rectifier-side and inverter-side IGBT module is established based on the relevant electric and heat parameters of the co-phase compensation converter, and the power loss and junction temperature of co-phase compensation converter under rated operating conditions are analyzed. Combined with the measured traction load data of high-speed railway and heavy-haul railway, the Bayerer model and the linear fatigue cumulative damage theory are used to evaluate the reliability of co-phase compensation converter under full time compensation and required time compensation. The results show that the difference of converter failure rate of heavy-haul railway is far lower than that of high-speed railway under full time compensation and required time compensation, due to different fluctuation degrees of the two kinds of traction loads. At the same time, a new operation mode is proposed to improve the reliability of co-phase compensation converter for heavy-haul railway loads.

Key words: combined co-phase power supply; co-phase compensation converter; junction temperature; reliability assessment; operation mode