

DOI: 10.7667/PSPC171857

风机并网变流器温升分析与控制参数优化

郭庆奎¹, 张洪阳², 张志锋³, 沈辉⁴

(1. 中国石油化工股份有限公司天津分公司, 天津 300271; 2. 中国石油化工股份有限公司抚顺石油化工研究院, 辽宁抚顺 113001; 3. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110023; 4. 国网河南省电力公司检修公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 并网变流器作为风电机组的核心部件之一, 其故障时间直接影响机组的发电量和度电成本。特别是在风机并网可靠性要求高和工况恶劣环境下, 变流器可靠性显得更重要。其中, 因变流器温升问题导致的停机故障已经成为影响可靠性的重要因素之一。分析了影响风机并网变流器温升的主要因素, 通过优化温升相关的开关频率、发波方式及影响 PWM 电压波形的吸收电容值大小等主要控制参数, 给出了风机并网变流器过温问题的保护与治理措施以及相关参数优化方案, 并对选用的 1.5 MW 双馈风机并网变流器进行了实验对比分析。通过实验数据可以看到, 同等条件下变流器的温升会明显降低, 实验结果证明了所提方案的有效性。

关键词: 变流器; 风电机组; 温升分析; 参数优化; 实验验证

Temperature rise evaluation and control parameter optimization of wind power grid converter

GUO Qingkui¹, ZHANG Hongyang², ZHANG Zhifeng³, SHEN Hui⁴

(1. SINOPEC Tianjin Branch, Tianjin 300271, China; 2. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Fushun 113001, China; 3. College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 4. Overhaul Corporation, State Grid Henan Electric Power Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Converter is one of the core components of the wind turbine and its fault time will directly affect the power generation and the cost. Its reliability will be more important in higher wind turbine reliability and critical conditions. The shutdown fault caused by the increased temperature has become one of the important factors that influence the reliability. The main factors of converter temperature increasing are analyzed in this paper, and the main control parameters, such as switching frequency, wave mode, and absorption capacitance, are designed optimally, and the protection and treatment measures and optimization process of over temperature are given. Comparison analysis based on 1.5 MW doubly fed wind turbine converter is carried out. Finally, the experimental data shows that the temperature of the converter would be significantly decreased under the same conditions, and the experimental results prove the effectiveness of the process.

This work is supported by Sinopec Group Funded Projects (No. 317018) and National Natural Science Foundation of China (No. 61603263).

Key words: converter; wind turbine; temperature analysis; parameter optimization; test verification

0 引言

风能作为一种可再生的清洁能源, 已经引起了国内外的高度关注, 装机量逐年增加。作为风电机组核心部件的并网变流器是影响风电系统可靠性的最重要的因素之一, 因而得到广泛研究。风电机组变流器容易出现极端高、低温现象, 由于安装空间

有限, 如何在有限空间内对高频、大电流的 IGBT 模块、电容部件等进行散热成为变流器散热设计和温升研究的关键^[1-4]。对于风机并网变流器温升的研究主要集中在系统和设备两个层面。

系统层面^[5-7], 文献[5]考虑了风电机组传输线母线槽绝缘风险, 设计了利用最小二乘算法对温度进行标定的专用红外测温传感器, 并且提出发热故障在线监测方法。考虑导线温升暂态过程, 进行事故后导线允许载流量分析, 文献[6]介绍了满足安全稳定约束的线路增容的方法。为解决由尖峰负荷变化

基金项目: 中国石化集团公司资助项目(317018); 国家自然科学基金项目资助(61603263)

引起不必要的负荷控制的问题,文献[7]利用预测的负荷曲线和环境温度变化曲线,并考虑动态热平衡过程,建立了断面潮流-温度模型。

设备层面^[8-15],文献[8]讨论了过大的 di/dt 和 dv/dt 的冲击问题,使开关管发热,如不采取保护措施,可能使功率开关管超出安全工作区而损坏。通过改进吸收电路在 IGBT 关断过程中对浪涌电压 dv/dt 的有效抑制,同时最大程度地降低了吸收电路的能量损耗,降低整机温度。在采取水冷散热方式的场合,IGBT 水冷基板可能存在冷却失效的危险,文献[9]中设计制作了一种平行微通道水冷基板,并且在多种变工况条件下进行了其传热性能的实验研究,表明了水冷基板部分流道堵塞的条件不会导致大幅温升。另外,在 IGBT 建模方面,由于 IGBT 模块的电学特性与热学特性存在着较强的耦合关系,动态电热耦合仿真因为能够反映 IGBT 模块工作特性得到了关注^[10]。文献[11]中,通过减少通态损耗模型线性近似处理次数的思想,转换建模思路,使改进的损耗模型相比于现有损耗模型,少了 4 次线性近似处理,精度平均提高了 9.21%。文献[12]中以 1.2 MW 直驱风力发电系统为例,利用提出的结温数值计算方法并结合实际风速和气温数据快速计算整年器件结温,采用 Bayerer 寿命模型和线性累计损伤理论实现了计入基频结温波动的风电变流器可靠性评估。文献[13]中对功率母线在内的热源进行分析计算,根据热阻网络为变流器设计了基于强迫风冷的散热系统。在建立变流器三维几何模型的基础上用计算流体动力学有限元软件对其进行模拟仿真,并提出了通过配置进风口开孔率和活动挡风板改进散热的措施。其他的,文献[14]针对多电平逆变器,分析了其功率损耗,对散热进行了一定的研究。建模方面,文献[15]中利用变流器元器件的结温计算方法,结合雨流法提取结温循环信息,建立风电变流器子系统级的可靠性多状态概率评估模型。在海上风电方面,文献[16]通过分析某兆瓦级海上风电机组冷却系统的散热器空间布置形式、散热通道结构设计以及散热器所配风扇性能,利用 CFD 软件对散热通道内流场进行了三维数值模拟,结果表明散热器的布置形式直接影响散热通道的系统阻力,进而影响散热器所配风扇与系统的特性匹配。还有学者采用 Fluent 分析不同散热布置方式下的散热通道阻力,结合莫迪文风扇选型平台,分析比较了不同散热布置方式下的系统特性匹配,得出了其中最佳散热布置方式^[17]。此外,在功率器件可

靠性和结温建模方面也有学者进行了研究^[18-19]。

综上,温升对风机并网的输电线路、变流器设备等都至关重要。特别地,变流器作为风机并网控制的核心设备,其温升问题更是影响风机发电,甚至是系统稳定的关键之一。因此,对风机并网变流器温升进行分析,对可靠发电和提高设备安全性都是十分必要的。本文以变流器整机作为研究对象,分析了影响风电并网变流器温升的主要因素,通过优化温升相关的开关频率、发波方式以及影响 PWM 电压波形的吸收电容值大小等主要控制参数,给出了风机并网变流器过温问题的治理措施,并进行实验验证。

1 温升模型和分析

1.1 温升模型

并网变流器直接与电网相连接,是实现风-机-电能量转换的关键。基本功能是实现直流母线电压稳定和功率因数可调,在高级要求的场合,还要具备一定的无功支撑能力。在理想电网下,电压型二电平并网变流器如图 1 所示,发电机侧变流器可采用多种形式,不受限制。

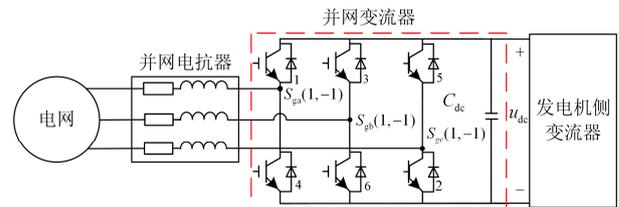


图 1 电压型两电平并网变流器

Fig. 1 Voltage-type two-level grid converter

从图 1 中可以看到,主要的发热元件是 IGBT、直流侧电容以及并网电抗器等。而实践中因 IGBT 温升过高导致的器件损坏是主要故障来源之一。在并网变流器运行当中,由于 IGBT 的开关动作,因此 IGBT 的热功率可以等效为开关损耗、通态损耗之和。

$$\begin{cases} P_{\text{cond}} = \frac{t_{\text{on}}}{T_s} \int_0^{t_{\text{on}}} v_{\text{CESAT}}(t) i_{\text{C}}(t) dt \\ P_{\text{sw}} = \frac{1}{t_{\text{off}}} \int_0^{t_{\text{off}}} v_{\text{CE}}(t) i_{\text{C}}(t) dt + \frac{1}{t_{\text{on}}} \int_0^{t_{\text{on}}} v_{\text{CE}}(t) i_{\text{C}}(t) dt \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{cond} 是通态损耗; P_{sw} 是开关损耗; T_s 是变流器开关时间; t_{on} 开通时间; t_{off} 关断时间; $v_{\text{CESAT}}(t)$ 是饱和 v_{CE} 电压。

根据电热比拟^[12],可以直接分析电路下的热能量变化,进而反映出温升的变化。针对变流器直流

母线侧, 由杂散电感感生的尖峰电压如式(2)所示。

$$\Delta v_{\text{overshoot}} = L_{\text{stray}} \frac{di}{dt} \quad (2)$$

式中: $\Delta v_{\text{overshoot}}$ 是感应出的尖峰电压; L_{stray} 是等效的杂散电感。则对应的热能量 ΔQ 如式(3)所示。

$$\Delta Q = \Delta P t = \left(\frac{\Delta v_{\text{overshoot}}}{L_{\text{stray}}} T_s \right)^2 R T_s \quad (3)$$

式中, R 是等效电阻。因此可以通过 ΔQ 的变化间接考量并网变流器的温升变化。

IGBT 的吸收电容相当于一个滤波器, 可以吸收掉一部分 PWM 开关电压尖峰。根据式(2)的感生尖峰电压, v_{ce} 最大电压如式(4)所示。

$$v_{\text{ce}} = V_{\text{dc}} + \Delta v_{\text{overshoot}} \quad (4)$$

电容值大小除了考虑吸收电容本身的温度特性有关之外, 较高的尖峰电压也不利于 IGBT 器件安全。根据杂散电感和杂散电容的能量守恒定律, 吸收电容 C_{snubber} 近似为

$$C_{\text{snubber}} = L_{\text{stray}} \cdot i_c^2 / (\Delta v_{\text{overshoot}})^2 \quad (5)$$

在同等 ESR 的情况下, 吸收电容的容量越大, 则承受的 I_{rms} 和 dv/dt 越大, 同等条件下更能满足温度要求(I_{rms} 是环境温度 70°C , 频率 100 kHz , 外壳温度达到 85°C 下的有效值)。

1.2 定性分析

由于受到工作环境、负载特性等影响, 风机变流器温升过程非常复杂, 这里仅在变流器工作条件下做定性分析。

通态损耗 P_{cond} 与电流 $i_c(t)$ 成正比, 与 IGBT 占空比 $\frac{t_{\text{on}}}{T_s}$ 成正比; 开关损耗 P_{sw} 与开关频率、电流

$i_c(t)$ 、电压 $v_{\text{CESAT}}(t)$ 成正比, 并且 P_{sw} 和 P_{cond} 均随 T_j (芯片结温) 升高而增加。另外, 同等 IGBT 开关模式下, 吸收电容值越大, 温升越低; 吸收电容值越小, 温升越高。变流器工作时的合成参考空间电压矢量需要多个开关器件按照计算的时间(占空比)动作。确定 PWM 开关作用时间后, 可以按照不同的发波方式形成合成矢量。以五段式 PWM 发波方式和七段式 PWM 发波方式为例, 在同等开关频率情况下, 变流器温度与三相开关管的翻转次数直接相关。说明如下:

图 2 是五段式和七段式在第一扇区的发波方式, 可以看出, 五段式发波方式每相的一个基波周期中在波谷处有连续 $1/3$ 的时间开关状态保持不变, 因此 IGBT 动作次数相比于七段式减少 $1/3$, 热损耗明

显减小。

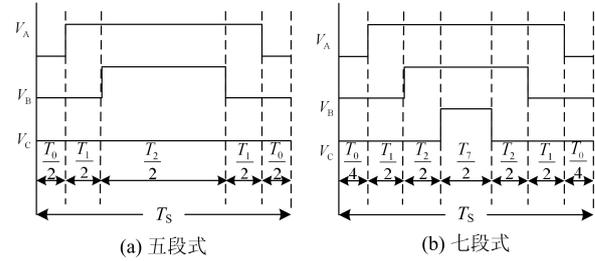


图 2 五段式和七段式发波

Fig. 2 Five and seven wave mode

值得注意的是 PWM 开关方式还直接影响电流谐波, 由于开关次数的减少, 导致波形中谐波含量增大, 会使并网电抗器发热, 因此要综合考量, 兼顾设计。

2 温升控制

分析变流器温升主要影响因素之后, 目的是能够对变流器运行过程进行温升控制, 以提高设备自身安全性, 降低故障率。根据 1 节中的描述, 将变流器温升情况分为系统级、IGBT 级、控制级三个层次进行保护和治理。温升保护控制流程如图 3 所示。变流器的一项重要措施就是温升控制, 一旦达到温度上限就要停机自保。保护机制如下:

- 1) 变流器系统(柜体)温度由主控系统监测并设定保护阈值, 变流器仅感知主控系统下发的温度信息, 并通过控制参数调整, 保证温度在可接受范围内; 温度限值 T_1 是柜体所有温度测试点中最大值。
- 2) IGBT 温度由外围电路通过 AD 采样到的温度信号经过信号调理后(滤波)将实际温度值与设定的 IGBT 模块温度阈值进行比较, IGBT 温度限值 T_2 是所有 IGBT 实时温度中的最大值。
- 3) 通过调整开关频率、发波方式等控制参数, 实现温升下降, 自动启停运行; 甚至离线情况下可修改吸收电容值等。同时, 如果无法保证温升在允许安全范围内, 则脱网停车。

3 参数优化和治理

3.1 参数优化

针对以上分析, 从软件角度通过优化开关频率和 PWM 发波方式可以实现温升改善; 另外, 从硬件角度可以通过更换吸收电容值实现 PWM 波形的改善, 进一步提升变流器温升指标。参数优化步骤如下:

- 1) 为避免因电流谐波大导致的电抗器等发热元件过温, 宜优先采用七段式发波, 以满足 T_1 要求。

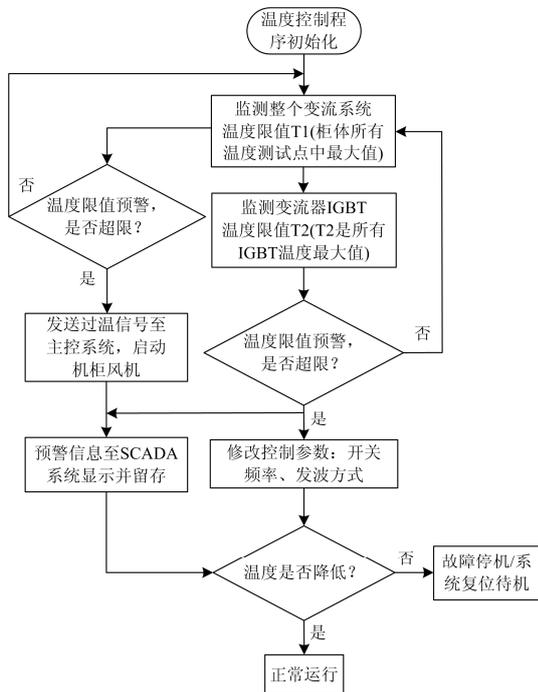


图3 温升控制流程

Fig. 3 Temperature control process

2) 在满足电流谐波条件下以开关频率下限运行, 以满足 T_2 要求。

3) 在 IGBT 吸收电容安置空间允许情况下, 适当增大吸收电容值, 在同等条件下改善 PWM 驱动电压波形。

由于实践中更换吸收电容的做法不易操作, 本文只讨论通过软件实现参数更改的开关频率 f 和发波方式 p 的优化方式。以 T_{1i} 和 T_{2i} 实际值作为参数优化的输入, 根据温度变化率实现开关频率 f 和发波方式 p 的优化, 如式(6)和式(7)所示。

当开关频率 f 一定时:

$$\begin{cases} T_{1i} - T_{1i-1} > 0, \text{ 且 } T_{2i} - T_{2i-1} < 0; \text{ 则 } p = 7 \\ T_{1i} - T_{1i-1} < 0, \text{ 且 } T_{2i} - T_{2i-1} > 0; \text{ 则 } p = 5 \\ T_{1i} < T_{1\max}, \text{ 且 } T_{2i} < T_{2\max} \end{cases} \quad (6)$$

当发波方式 p 一定时:

$$\begin{cases} T_{1i} - T_{1i-1} > 0, \text{ 且 } T_{2i} - T_{2i-1} > 0; \text{ 则 } f \text{ 减小} \\ T_{1i} - T_{1i-1} < 0, \text{ 且 } T_{2i} - T_{2i-1} < 0; \text{ 则 } f \text{ 升高} \\ T_{1i} < T_{1\max}, \text{ 且 } T_{2i} < T_{2\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{1i} 和 T_{1i-1} 是 T_1 的前后采样温度; T_{2i} 和 T_{2i-1} 是 T_2 的前后采样温度; $T_{1\max}$ 是 T_1 的允许最大值; $T_{2\max}$ 是 T_2 的允许最大值。

3.2 综合治理

除了开关频率、PMW 调制方式和吸收电容值

和的差异之外, 影响变流器温升的原因还有很多。式(6)和式(7)只是基于主要控制参数的优化, 如图1所示结构, 风路设计、功率器件布局、冷却方式等都是影响变流器温升的因素。

从 IGBT 本身散热来讲, 采用高散热系数的散热片也是降低变流器温度的一个主要原因, 在采用水冷系统的功率器件中, 水冷散热片的材质和水路形式至关重要。由于拥有的单体 IGBT 较多, 集中分布方式不合理导致的散热问题也较为突出, 因此对于结构分布设计也有一定的要求。减小变流器主电路的杂散电感主要有两种方式: 一种方式是采用叠层母排等方法降低变流器直流母排杂散电感; 另一种方式是采用吸收电容来消除杂散电感的影响, 降低 IGBT 所承受的尖峰电压。

4 实验设计和结果分析

为了验证以上分析, 本文在 1.5 MW 双馈风力发电机用并网变流器基础上进行了一系列的对比分析。实验设计的测试系统如图4所示, 双馈发电机和并网变流器参数如表1和表2所示。表1中发电机冷却方式为液冷。

表1 双馈发电机参数

Table 1 Parameters of DFIG

参数	数值
功率/kW	1 520
频率/Hz	0~66.7
功率因数	0.88
额定转速/(r/min)	1 800
电压/kV	0.69
电流/A	1 092

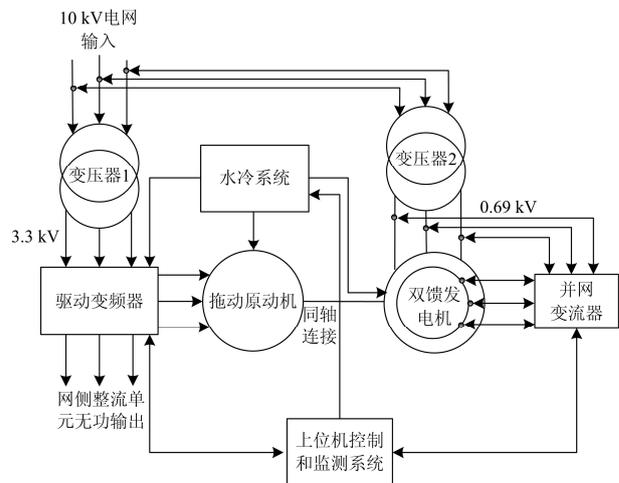


图4 测试系统

Fig. 4 Test system

变流器部分参数如表 2 所示。其中 PWM 调制方式采用 SVPWM, 散热方式采用水冷, IGBT 为双管封装, 直流母排为叠层母排。

表 2 变流器部分参数

Table 2 Partial parameters of converter

参数	数值
吸收电容/ μF	1.0
IGBT 额定电压/V	1 700
IGBT 额定电流/A	450
直流电容值/ μF	14 100
直流电容耐压/V	1 350
开关频率/Hz	3 000

并网发电过程模拟了从 0~1 500 kW 的加载过程以及 1 500~0 kW 的减载过程。其中定子电流如图 5 和图 6 所示。

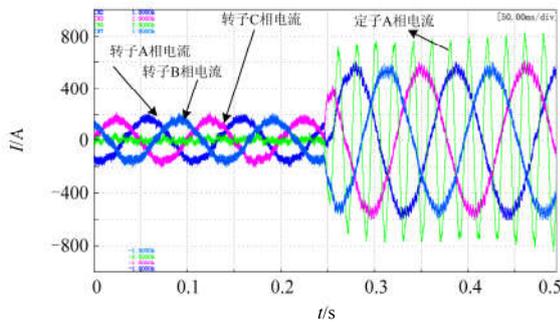


图 5 加载定子电流

Fig. 5 Load addition current of stator and rotor

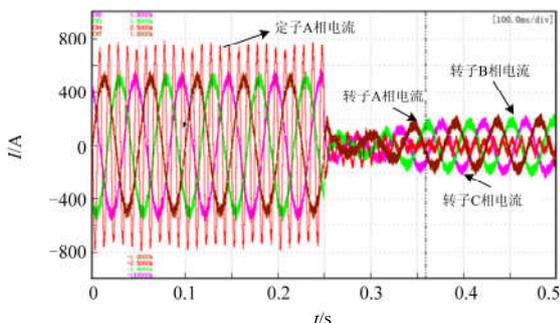


图 6 减载定子电流

Fig. 6 Load reduction current of stator and rotor

根据 1.2 的分析, 采用五段式和七段式的变流器三相桥臂开通的方式如图 7 和图 8 所示。可以看出五段式 SVPWM 中, 在任何一个开关周期 T_s 内, 有一相的相电压不发生反转, 占空比为 0 或 1。将变流器置于温箱内, 温箱环境温度为 $51\text{ }^\circ\text{C}$, 变流器满载运行 1.5 h, 同等实验条件下, 对机侧吸收

电容为 $1.0\text{ }\mu\text{F}$ 和 $0.68\text{ }\mu\text{F}$ 进行温度对比测试, 如图 9 所示, 可以看到温度最高降低达 $7.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

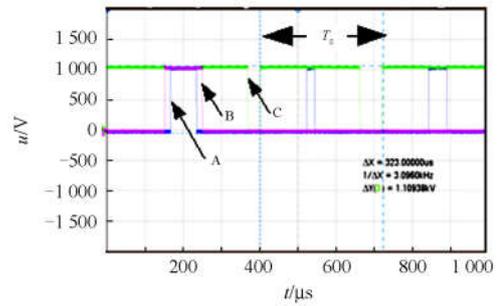


图 7 五段式发波

Fig. 7 Wave of five section

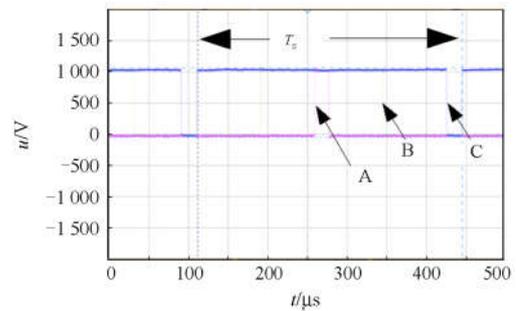


图 8 七段式发波

Fig. 8 Wave of seven section

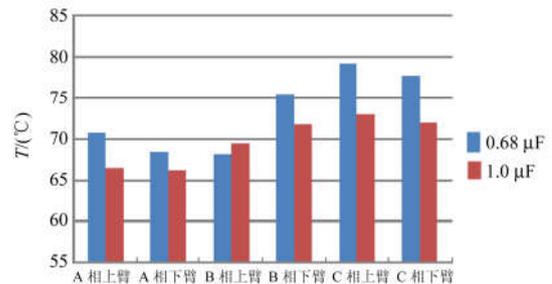


图 9 $1.0\text{ }\mu\text{F}$ 和 $0.68\text{ }\mu\text{F}$ 吸收电容温度对比

Fig. 9 Temperature comparison of $1.0\text{ }\mu\text{F}$ and $0.68\text{ }\mu\text{F}$

针对发波方式, 在上述同等实验条件下, 对机侧五段式和七段式发波方式进行温度对比测试, 如图 10 所示, 可以看到温度最高降低 $8\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 效果明显。其中, 由于测试点的不同, 导致各处温度值略有差异。对网侧吸收电容为 $1.0\text{ }\mu\text{F}$ 和 $0.68\text{ }\mu\text{F}$ 进行温度对比测试, 如图 11 所示, 可以看到温度最高降低达 $6.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。同等实验条件下, 对网侧五段式和七段式发波方式进行温度对比测试, 如图 12 所示, 可以看到温度最高降低 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 效果明显。其中, 由于选取测试点的不同, 导致各处温度值略有差异。

综上，证明了分析的正确性。

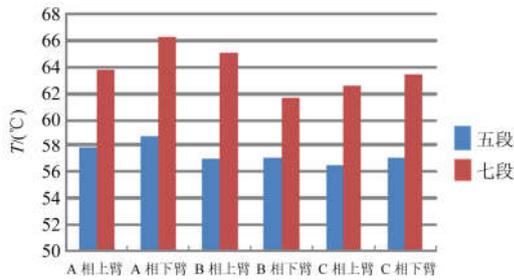


图 10 五段和七段机侧调制方式温度对比

Fig. 10 Temperature comparison of five and seven wave pattern

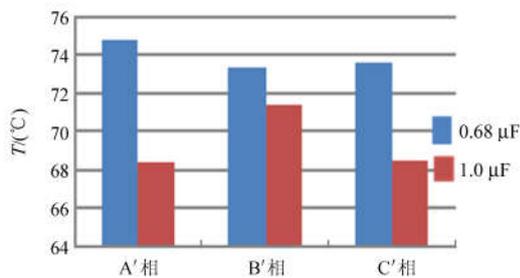


图 11 1.0 μF 和 0.68 μF 吸收电容温度对比

Fig. 11 Temperature comparison of 1.0 μF and 0.68 μF

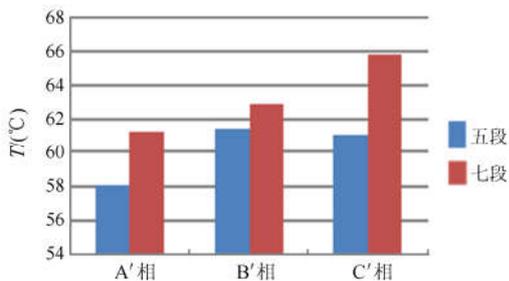


图 12 五段和七段网侧调制方式温度对比

Fig. 12 Temperature comparison of five and seven wave pattern

此外，从工程实践中亦可通过提高变流器散热效率、更换功率器件的导热硅脂等方式降低变流器温度，不过以上手段都需要长期停机，严重影响发电量，本文分析方法和控制手段可以尽量降低停机时间，对提升风机发电量具有指导意义。

5 总结

本文从系统角度对风电变流器温升问题进行了研究和分析，重点围绕影响风机并网变流器温升的主要因素展开。通过优化温升相关的开关频率、发波方式以及影响 PWM 电压波形的吸收电容值大小等主要控制参数，给出了风机并网变流器过温问题的保护和治理措施。选用 1.5 MW 双馈风机并网变

流器进行了实验对比分析，通过本文研究的控制方法和温升保护流程可以看到，同等条件下变流器的温升会明显降低，实验结果证明了该方案的有效性。

最后，随着风电机组的规模增大以及其自身功率的波动性，如何进一步提高变流器的可靠性值得深入探索。

参考文献

- [1] 孙祖勇, 杨飞, 孙远, 等. 风电变流器 IGBT 散热性能研究[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 47-49.
SUN Zuyong, YANG Fei, SUN Yuan, et al. Study of heat dissipation performance of IGBT module in wind power converter[J]. Power Electronics, 2015, 49(1): 47-49.
- [2] AMIRAT Y, BENBOUZID M E H, AL-AHMAR E, et al. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2629-2636.
- [3] 于静梅, 张兴, 孟凡丹, 等. 风电变流器电容部件散热分析及仿真优化[J]. 热科学与技术, 2016, 15(3): 197-203.
YU Jingmei, ZHANG Xing, MENG Fandan, et al. Thermal analysis and simulation optimization of capacitive components in wind power converter[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2009, 13(9): 2629-2636.
- [4] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [5] 黄新波, 张杰, 田毅, 等. 风电母线槽热故障状态在线监测系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 130-137.
HUANG Xinbo, ZHANG Jie, TIAN Yi, et al. On-line monitoring system for wind power busbar trunk heat fault status[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 130-137.
- [6] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的输电线路动态增容[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 15-22.
XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 15-22.
- [7] 范京艺, 毛安家, 刘岩, 等. 基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 116-121.
FAN Jingyi, MAO Anjia, LIU Yan, et al. Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve[J]. Power

- System Protection and Control, 2018, 46(1): 116-121.
- [8] 朱修敏, 魏金成, 魏力, 等. 一种新型 PWM 逆变器吸收电路[J]. 电子技术应用, 2016, 42(7): 138-145.
ZHU Xiumin, WEI Jincheng, WEI Li, et al. A new snubber circuit based on PWM inverter[J]. Power Supply Technology and its Application, 2016, 42(7): 138-145.
- [9] 赵国亮, 李卫国, 乔尔敏, 等. IGBT 水冷基板瞬态启停及变工况运行特性实验研究[J]. 热科学与技术, 2014, 13(4): 352-358.
ZHAO Guoliang, LI Weiguang, QIAO Ermin, et al. Experimental study on transient characteristics of liquid-cooling plate under start/stop and off-design conditions[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2014, 13(4): 352-358.
- [10] ZHOU Z, KANNICHE M S, BUTCUP S G, et al. High-speed electro-thermal simulation model of inverter power modules for hybrid vehicles[J]. Electric Power Applications, 2011, 5(8): 636-643.
- [11] 刘任, 唐波, 孙睿, 等. 用于 IGBT 模块动态电热耦合仿真的损耗模型优化[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, 38(3): 64-68.
LIU Ren, TANG Bo, SUN Rui, et al. Loss model optimization for dynamic electro-thermal simulation of IGBT module[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, 38(3): 64-68.
- [12] 杜雄, 李高显, 孙鹏菊, 等. 考虑基频结温波动的风电变流器可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 258-265.
DU Xiong, LI Gaoxian, SUN Pengju, et al. Reliability evaluation of wind power converters considering the fundamental frequency junction temperature fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 258-265.
- [13] 朱艺锋, 葛琼璇, 刘育红, 等. 75 kVA 三电平背靠背逆变器的散热分析及优化[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 103-108.
ZHU Yifeng, GE Qiongxuan, LIU Yuhong, et al. Analysis and optimization of cooling system for 75 kVA three-level back-back converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 103-108.
- [14] ZAMBRA D A B, RECH C, GONCALVES F A S, et al. Power losses analysis and cooling system design of three topologies of multilevel inverters[C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece: 4290-4295.
- [15] 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.
- [16] 刘海涛, 王丁会, 刘广林, 等. 浅析海上风电机组的散热布置[J]. 可再生能源, 2013, 31(4): 71-73.
LIU Haitao, WANG Dinghui, LIU Guanglin, et al. Cooling layout analysis of offshore wind turbine[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(4): 71-73.
- [17] 刘海涛, 章双全, 王海龙. 海上双馈机组的散热布置优化研究[J]. 机电工程, 2014, 31(5): 634-638.
LIU Haitao, ZHANG Shuangquan, WANG Hailong. Cooling layout optimization of offshore double-fed wind turbine[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014, 31(5): 634-638.
- [18] MA K, YANG Y, WANG H, et al. Design for reliability of power electronics in renewable energy systems[M]. Springer International Publishing, 2014: 1-17.
- [19] YANG Y, MA K, WANG H, et al. Instantaneous thermal modeling of the DC-link capacitor in photovoltaic systems[C] // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), March 15-19, 2015, Charlotte, USA: 2733-2739.

收稿日期: 2017-12-22; 修回日期: 2018-03-28

作者简介:

郭庆奎(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力技术; E-mail: guoqk630521@163.com

张洪阳(1982—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为新能源发电及电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: pmsm@163.com

张志锋(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为现代电机控制技术。E-mail: 511378255@qq.com

(编辑 张爱琴)