

三电平逆变器实时开关特性在线检测方法研究

宋明轩,冯源,张甜,何凤有,高捷

(中国矿业大学 电气与动力工程学院,江苏 徐州 221000)

摘要:针对目前NPC三电平逆变器缺乏实时运行状态检测方法的现状,研究了一种间接检测方法。该方法分析了NPC三电平逆变器的换流过程,根据基尔霍夫定律,建立了三电平回路检测的电流和电压模型。相较于需要大量测量单元的直接测量方法,该方法仅使用3个电流检测单元和3个电压检测单元,就能够获得单相桥臂的4个IGBT和2个钳位二极管的运行状态。通过单相桥臂的脉冲实验对该方法的正确性进行了验证,实验结果表明,该方法可以实时检测NPC三电平逆变器功率器件的运行状态,在方便安装的同时降低了测量成本,对于NPC三电平逆变器的设计应用和故障预防具有一定的参考意义。

关键词:逆变器;功率器件;在线检测

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23560

Research on Online Test Method for Real Time Switching Characteristics of Three-level Inverter System

SONG Mingxuan, FENG Yuan, ZHANG Tian, HE Fengyou, GAO Jie

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221000, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the lack of realtime detection methods of operation status for NPC three-level inverter, an indirect detection method was studied. In this method, the commutation process of NPC three-level inverter was analyzed. And according to Kirchhoff's law, the current and voltage models of three-level circuit test were built. Compared with the direct measurement method which needs large numbers of measurement devises, only three current detection units and three voltage detection units were used to obtain the operation status of four IGBTs and two clamping diodes of single-phase bridge arm in this method. The correctness of the method was verified by the pulse experiment of single-phase bridge arm. The experimental results show that this method can obtain the operation status of power devices for NPC three-level inverter in real time. At the same time, the installation of equipment is more convenient, and the measurement cost is reduced. It has certain reference significance for the design and application and fault prevention of NPC three-level inverter.

Key words: inverter; power device; online test

在过去的三十年中,多电平变换技术得到了长足的发展。目前应用最为广泛的多电平变流器拓扑为中点钳位型(neutral point clamped, NPC)三电平结构^[1]。

其中,作为电力电子器件的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)是NPC三电平逆变器的核心^[2]。NPC三电平逆变器的结构较为复杂,每一相桥臂都由多个IGBT和

二极管构成。这种多器件的结构使得在实际的应用过程中,很难对IGBT等功率器件进行状态监测。这对NPC三电平逆变器的优化设计和故障预防造成了很大的阻碍,根据相关调查,在变频调速系统中逆变器故障占整体驱动系统故障的82.5%,另外在光伏电站运营过程中,逆变器系统故障比例占整体光伏电站常见故障的60%^[3]。

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX212229)

作者简介:宋明轩(1997—),男,硕士研究生,Email:TS19130200P31@cumt.edu.cn

当前大部分针对功率器件的测试都是基于双脉冲测试或在特定的电路中^[4]进行,无法得知功率器件在逆变器中的实际运行状态。所以目前急需一种在线检测方法,文献[5]提出了一种电流在线检测方法,在两个钳位二极管以及负载处安装罗氏线圈,测量结果比较精确,但是检测装置的安装较为困难,并且只对功率器件的电流进行检测,没有对电压进行检测。

本文针对当前现状,设计了一种电流和电压在线检测方法。在一个单相桥臂中,仅需要3个电流检测单元和3个电压检测单元就能计算出模块内的4个IGBT和2个钳位二极管的电流和电压。并且本方法能够实时、准确地反映NPC三电平逆变器运行过程中功率器件开关瞬态的状态。

1 三电平逆变器换流回路分析

在不考虑二极管的反向恢复、回路寄生电感以及IGBT的等效电容影响的理想情况下,分析NPC三电平逆变器单相桥臂的运行状态。根据负载电流 i_L 的方向,可以将逆变器的换流回路分为图1中的6条^[6-7]。

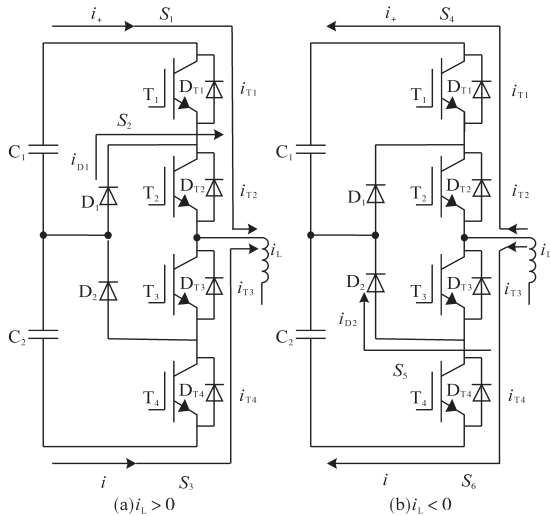


图1 NPC三电平逆变器单相桥臂换流回路

Fig. 1 Single phase bridge arm commutation circuit of NPC three-level inverter

图1中, $i_{T1}, i_{T2}, i_{T3}, i_{T4}$ 分别为4个IGBT的电流; i_{D1}, i_{D2} 为钳位二极管的电流; i_+ 和 i_- 分别为正、负母线电流; i_L 为负载电流; $S_1 \sim S_6$ 为标记的6条电流回路。

根据三电平逆变器的开关特性, T_1 与 T_3 为互补开关状态, T_2 与 T_4 为互补开关状态。设 i_L 流向负载的方向为正方向。

当 $i_L > 0$ 时,逆变系统的电流路径如图1a所示,电流回路在 S_1, S_2 和 S_3 之间转换。 T_2 保持导通时, T_1 的开关动作使电流回路在 S_1 和 S_2 之间切换; T_3 保持导通时, T_2 的开关动作使电流回路在 S_2 和 S_3 中切换。

当 $i_L < 0$ 时,逆变系统的电流回路如图1b所示,电流回路在 S_4, S_5 和 S_6 之间转换。 T_3 保持导通时, T_4 的开关动作使电流回路在4和5中切换; T_2 保持导通时, T_3 的开关动作使电流回路在 S_4 和 S_6 中切换。

2 检测模型的建立

基于上述分析,根据电路的基尔霍夫定律,可以对检测装置的安装位置进行确定。

在目前大功率的逆变器装置中,通常采用的是层叠母排的布线方式,再加上功率器件的模块化设计,使得功率器件的电流与电压不易直接测量,通过间接测量的方式,可以较为方便地得到功率器件的状态,测量单元的安装位置如下图2所示。

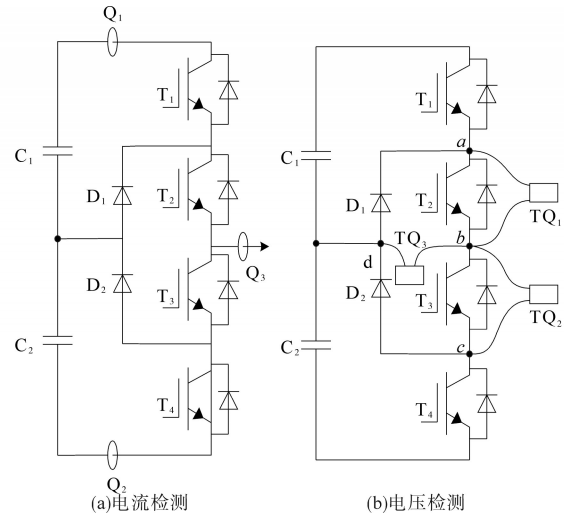


图2 NPC三电平逆变器单相桥臂测量单元安装位置

Fig. 2 Installation position of single phase bridge arm detection device for NPC three-level inverter

图2中, Q_1, Q_2 和 Q_3 为电流测量单元, Q_1 测量正母线电流 i_+ , Q_2 测量负母线电流 i_- , Q_3 测量负载电流 i_L ,电流正方向为图2a中的箭头所示; TQ_1, TQ_2, TQ_3 为电压测量单元, V_{TQ1} 为 T_2 的集射极电压, V_{TQ2} 为 T_3 的集射极电压, V_{TQ3} 为负载和零母线之间电压。

2.1 电流模型的建立

经过上述对电流回路分析,可以建立理想情况下的电流检测模型:

$$\begin{cases} i_{T1} = i_+ \\ i_{T2} = \begin{cases} i_L + i_- & i_L \geq 0 \\ i_+ & i_L < 0 \end{cases} \\ i_{T3} = \begin{cases} i_- & i_L \geq 0 \\ i_+ - i_L & i_L < 0 \end{cases} \\ i_{T4} = i_- \\ i_{D1} = \begin{cases} i_L + i_- - i_+ & i_L \geq 0 \\ 0 & i_L < 0 \end{cases} \\ i_{D2} = \begin{cases} 0 & i_L \geq 0 \\ i_+ + i_- - i_L & i_L < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

可以看出,针对负载电流正负的不同,每个功率器件的电流都有各自对应的表达式,表明理想情况下,可以通过间接测量的方法得到各个功率器件的电流。

在实际的开关瞬态,由于IGBT等效电容、二极管的反向恢复以及母排杂散电感的影响,系统在进行换流时存在小的换流回路,会影响测量精度^[8]。

以 $i_L > 0$, 电流在 S_1 和 S_2 之间切换为例, T_1 开通, T_3 关断, 换流发生在 T_1 开通瞬态, 此时 T_3, T_4 处于关断状态, 由于 IGBT 等效输出电容的存在, 处于关断状态 IGBT 的集射极间电压突变时, 会有电流流过等效电容, 而 T_4 端电压被 D_2 钳位不能上升, T_3 端电压的改变会使电流经过它的寄生电容, 与此同时 D_1 发生反向恢复, 使得两个钳位二极管中都会有电流经过, 对计算的结果产生影响; 但当 T_1 关断时, 电流回路由 S_2 转换为 S_1 , T_3 端电压为 0, T_4 端电压变化, 会产生微小的电流, D_2 电流始终为 0, 此时小电流影响较小。同理, 由于非理想因素的存在, 在其他换流过程发生时, 也会产生小电流回路影响间接测量的结果。通过实验确定其影响, 进行误差的分析。

2.2 电压模型的建立

在不考虑功率器件以及母排中的杂散电感的理想情况下, 根据基尔霍夫定律, 可以列出各个功率器件模块的集射极电压表达式。可列出理想电压模型如下:

$$\begin{cases} V_{T1} = V_+ - V_{TQ3} - V_{TQ1} \\ V_{T2} = V_{TQ1} \\ V_{T3} = V_{TQ3} \\ V_{T4} = V_- + V_{TQ3} - V_{TQ2} \\ V_{D1} = V_{TQ1} + V_{TQ3} \\ V_{D2} = V_{TQ2} - V_{TQ3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_+ 为正母线电压; V_- 为负母线电压; $V_{T1}, V_{T2}, V_{T3}, V_{T4}$ 分别为 $T_1 \sim T_4$ 4 个 IGBT 的集射极电压; V_{D1}, V_{D2} 为两个钳位二极管两端电压。

在实际应用中, IGBT 模块封装内部以及母排具有一定的杂散电感^[9], 在 IGBT 开关瞬态, 过高的电流变化率会使得杂散电感产生较大的感应电势, 造成测量误差。单相 NPC 三电平电路的简化杂散电感分布示意图如图 3 所示。图 3 中, $L_{T1}, L_{T2}, L_{T3}, L_{T4}, L_{D1}, L_{D2}$ 分别为 4 个 IGBT 和 2 个钳位二极管内部的杂散电感以及其临近母排的局部杂散电感。

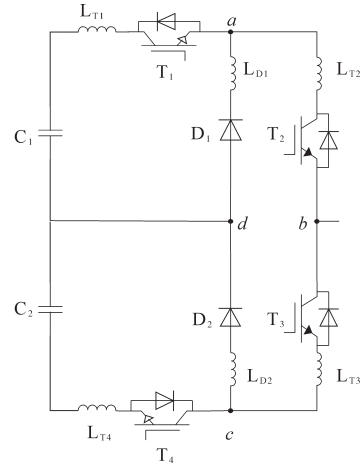


图3 NPC三电平逆变器单相桥臂简化杂散电感分布

Fig.3 Simplified stray inductance distribution of single phase bridge arm in NPC three-level inverter

加入功率器件和母排的杂散电感影响之后, 可以对电压模型进行优化, 这个过程依据基尔霍夫定律, 使用电路中电流测量结果的微分, 排除功率器件和母排中杂散电感电压的影响。优化后的表达式如下式所示:

$$\begin{cases} V_{T1} = V_+ - V_{TQ3} - V_{TQ1} - L_{T2} \frac{di_+}{dt} \\ V_{T2} = \begin{cases} V_{TQ1} - L_{T2} \frac{d(i_L - i_-)}{dt} & i_L \geq 0 \\ V_{TQ1} - L_{T2} \frac{di_+}{dt} & i_L < 0 \end{cases} \\ V_{T3} = \begin{cases} V_{TQ2} - L_{T3} \frac{di_-}{dt} & i_L \geq 0 \\ V_{TQ2} - L_{T3} \frac{d(i_+ - i_L)}{dt} & i_L < 0 \end{cases} \\ V_{T4} = V_- + V_{TQ3} - V_{TQ2} - L_{T4} \frac{di_-}{dt} \\ V_{D1} = \begin{cases} V_{TQ1} + V_{TQ3} + L_{D1} \frac{d(i_L + i_- - i_+)}{dt} & i_L \geq 0 \\ V_{TQ1} + V_{TQ3} & i_L < 0 \end{cases} \\ V_{D2} = \begin{cases} V_{TQ2} - V_{TQ3} & i_L \geq 0 \\ V_{TQ2} - V_{TQ3} + L_{D2} \frac{d(i_+ - i_- + i_L)}{dt} & i_L < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)中可以看出, 想要提高电压检测的

精度,需要第2节中电流的检测进行配合。相较于理想情况下的电压模型,式(3)的模型尽可能地排除了系统中杂散电感的影响,能有效提高测量的精度。

3 实验

实验平台采用英飞凌公司型号为FF650R17IE4(1 700 V/650 A)的IGBT模块搭建NPC三电平逆变器单相桥臂电路,将母线电压设置为1 000 V,负载电流600 A。IGBT的驱动电路发出预设的脉冲,以模拟逆变器状态改变时的换流回路。使用PEM公司生产的型号为CWT30B的罗氏线圈作为电流测量单元,最高测量带宽16 MHz,最大测量电流6 kA;使用KEYSIGHT公司型号为N2891A的70 MHz/7 kV差分探头作为电压测量单元,能够满足测量的要求。在采用间接测量方法的同时,对器件的状态进行直接测量,以验证测量的结果分析误差。

3.1 电流检测实验

从式(1)电流模型中可知, i_{T1} , i_{T4} 可以直接得到,需要对 i_{T2} , i_{T3} , i_{D1} , i_{D2} 进行验证,又由NPC三电平电路的对称性可知, $i_{i1}>0$ 与 $i_{i1}<0$ 的情况相类似,所以仅需在负载电流为正时,对 i_{T2} 与 i_{D1} 电流的间接测量值进行验证。因此,控制驱动电路发出脉冲,模拟电流回路由 S_2 - S_1 - S_2 ,由 S_3 - S_2 - S_3 的换流过程,测量开关瞬态的功率器件电流,实验结果如图4、图5所示。

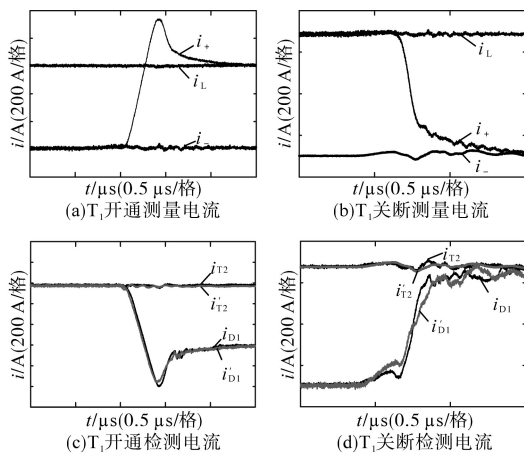


图4 换流回路为 S_1 和 S_2 的电流检测情况

Fig.4 Current test when the current path is S_1 and S_2

图4a,图4b,图5a,图5b为测量的三点电流,图4c,图4d,图5c,图5d为在线测量与实际测量的结果对比,其中实际测量值为黑色线条,在线测量结果为灰色线条且用原符号加“'”标注。实

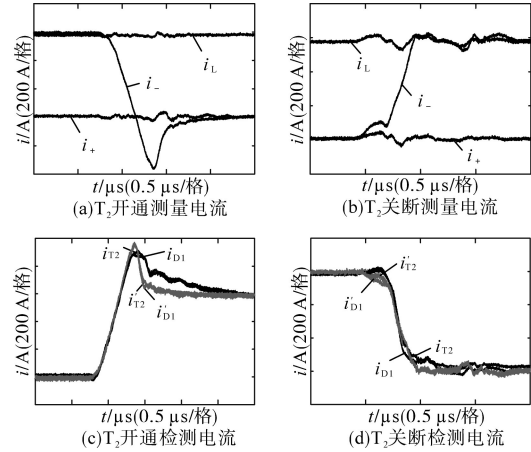


图5 换流回路为 S_2 和 S_3 的电流检测情况

Fig.5 Current test when the current path is S_2 and S_3

验结果同理论分析的情况相同,当电流稳定时,间接检测的结果能够很好地跟随电流的实际情况。而在开关瞬态,可以分为两种情况,回路由 S_1 - S_2 , S_2 - S_3 换流时,此时小电流回路的影响很小,在 T_1 关断和 T_2 关断时,在线测量的结果可以较好地跟随实际测量结果,反映器件的特性。 T_1 关断时, T_2 电流波动较小,最大误差出现在 T_1 关断瞬态,钳位二极管 D_1 检测电流误差在50 A左右; T_2 关断时,最大误差在 T_2 关断瞬态,此时 T_2 检测电流误差在40 A以内, D_1 检测电流由于 i_+ 影响误差较大。而当回路由 S_2 - S_1 , S_3 - S_2 换流时,开关瞬间会在钳位二极管中产生换路电流,间接测量难以直接监控到钳位二极管的电流,此时计算结果误差较为明显,特别是在 T_2 开通时,可以发现此时实际电流趋近稳定时间变长,检测电流波形在这1 μ s的过程中不能很好地跟随,此时电压尖峰接近1 000 A,误差在100 A以内。从整体来看,实验验证了电流的可测性。

3.2 电压检测实验

同样模拟电流回路由 S_2 - S_1 - S_2 和 S_3 - S_2 - S_3 的切换过程,验证电压的检测方法,实验结果如图6、图7所示。

对应电流测量的结果,由实验波形分析可知,电压的检测效果较好,间接计算的结果能够很好地跟随直接测量的结果,在开关瞬态的电压尖峰,仍然能够得到比较准确的测量结果,最大误差出现在 T_1 关断时,经过计算, V_{T1} 在电压尖峰处最大误差百分比在5%左右。虽然间接检测的结果在一定范围内波动比较明显,但是跟随性与准确性较好,能够验证电压的可测性,针对杂散电感所做的优化起到了应有的作用。

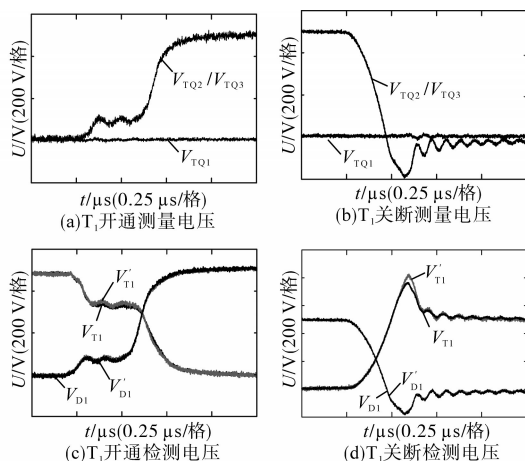


图6 换流回路为 S_1 和 S_2 的电压检测情况

Fig. 6 Voltage test when the current path is S_1 and S_2

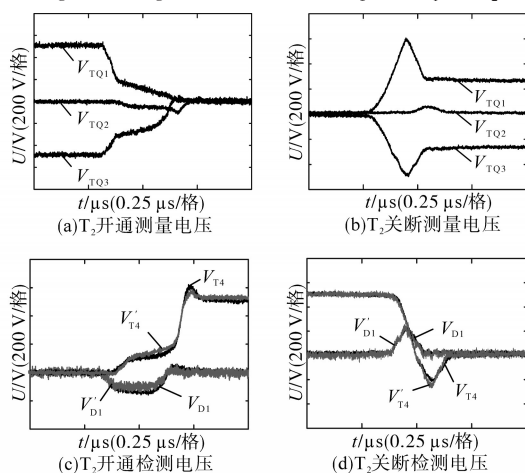


图7 换流回路为 S_2 和 S_3 的电压检测情况

Fig. 7 Voltage test when the current path is S_2 and S_3

4 结论

本文针对NPC三电平逆变器,提出了一种简化的功率器件电流和电压的在线测试方法,通过脉冲实验模拟逆变器的开关过程验证了测试方法的正确性和有效性。该方法可以采用较少的测量单元对逆变器的实时运行状态进行监测,能够明显地降低测量成本,同时测量的结果具有较好的准确性,对于三电平逆变器的优化设计和故障预防提供了有价值的参考。

参考文献

[1] 何湘宁,陈阿莲.多电平变换器的理论和应用技术[M].北

京:机械工业出版社,2006.

He Xiangning, Chen Alian. Theory and application technology of multilevel converter[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.

[2] 张凯,高峰.一种可提高IGBT可靠性的新型结温管控策略[J].电气传动,2020,50(2):92-96.

Zhang Kai, Gao Feng. A new junction temperature control strategy which improve IGBT reliability[J]. Electric Drive, 2020, 50(2):92-96.

[3] 马铭遥,凌峰,孙雅蓉,等.三相电压型逆变器智能化故障诊断方法综述[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7683-7699.

Ma Mingyao, Ling Feng, Sun Yaron, et al. Review of intelligent fault diagnosis methods for three-phase voltage-mode inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23):7683-7699.

[4] 李永皓,陈敏.IGBT模块开关特性测试研究与驱动参数选择方法[J].电源学报,2020,18(1):162-167.

Li Yonghao, Chen Min. Research on IGBT module switching characteristics test and selection method for driving parameters [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1):162-167.

[5] 何湘宁,吴岩松,杨兵建,等.大功率三电平逆变器的开关模式转换状态的实时监测[J].中国电机工程学报,2012,32(30):54-60,10.

He Xiangning, Wu Yansong, Yang Bingjian, et al. Real-time state monitoring during switching mode transitions in high power three-level inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30):54-60, 10.

[6] He J, Demerdash N A O. An on-line diagnostic method for open-circuit switch faults in NPC multilevel converters[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2016:1-7.

[7] Abari I, Lahouar A, Hamouda M, et al. Fault detection methods for three-level NPC inverter based on DC-bus electromagnetic signatures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7):5224-5236.

[8] 杨兵建.基于IGBT的大功率三电平逆变器控制与测试方法等相关问题研究[D].杭州:浙江大学,2011.

Yang Bingjian. Research on control and test methods of IGBT-based high power three-level inverter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

[9] 陈向俊,唐吉林,郑琦琦,等.考虑寄生参数影响的高压叠层母线排优化设计[J].电气传动,2017,47(7):72-75.

Chen Xiangjun, Tang Jilin, Zheng Qiqi, et al. Optimization design of high power laminated bus bars considering the effects of parasitic parameters [J]. Electric Drive, 2017, 47(7):72-75.

收稿日期:2021-05-26

修改稿日期:2021-07-07