

三相PWM整流器电路谐振过电压分析及预防

张绍军¹,张嘉彧²

(1. 西门子工厂自动化工程有限公司西安分公司, 陕西 西安 710065;

2. 西门子工厂自动化工程有限公司, 北京 100005)

摘要:在三相6开关电压型PWM整流器电路的实际应用中,会发生过电压导致击穿器件绝缘的现象,而目前业界对这种现象研究较少。从新的理论机理分析,发现整流器电路进线阻抗不匹配以及电路的寄生电容电感,这两个因素引发的电路谐振是引起瞬态过电压的主要原因。基于此机理之上,针对性地提出了实用有效的预防方法,经过较多的实际现场验证,证明其对预防此类故障是有效的。

关键词:三相PWM整流器;谐振;瞬态过电压;进线阻抗;寄生电容和电感

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed21662

Resonance Overvoltage Analysis and Prevention for the 3-phase PWM Rectifier Circuit

ZHANG Shaojun¹, ZHANG Jiayu²

(1. SIEMENS Factory Automation Engineering Xi'an Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China;

2. SIEMENS Factory Automation Engineering Co., Ltd., Beijing 100005, China)

Abstract: There is the transient overvoltage in the 3-phase PWM rectifier circuit, so that the component insulation is broken sometimes, but the research of it is few present. From new principle, the overvoltage comes from the circuit resonance oscillation. The resonance is from two reasons: one is the unsuitable impedance match between the line supply and the drive, another is from the drive system parasitic capacitance and inductances. And on this analysis, some solutions were available to protect the PWM circuit and make it from away the transient overvoltage. After some years used in many sites, the solutions are useful.

Key words: 3-phase PWM rectifier; resonance; transient overvoltage; line supply impedance; parasitic capacitance and inductances

三相6开关电压型PWM整流器属Boost型功率因数调节的整流器,可四象限运行同时也是逆变器。具有电流功率因数接近于1,电流波形正弦化,谐波小,控制精度高,直流母线电压稳定,能量可再生回馈的特点。原理如图1所示。

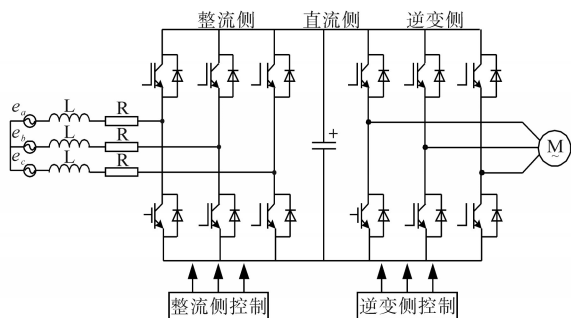


图1 三相PWM整流器驱动系统拓扑结构

Fig.1 Topology of PWM rectifier circuit

IGBT模块内集成整流二极管和IGBT单管,6个二极管构成非受控三相二极管整流桥,6个全控器件IGBT则分别和二极管并联,形成三相6开关电压升压型PWM拓扑电路。由PWM整流器构成的电路同时也包含PWM方式控制的逆变器用于驱动电机,即两端均为PWM方式控制。近些年来,随着对高性能驱动的需求,以及节能环保、电磁兼容性要求愈加严格,三相6开关电压型PWM整流器得到了越来越多的重视和实际应用。

目前业界对于三相PWM整流器,更多的是研究其控制理论策略,对于实际工程应用中的失效现象总体研究较少。部分研究将失效原因归结为IGBT过流过热等,但实际中相当多的案例中找不到负载过大、IGBT过流和温度过高的现象,这说明对其失效机理认识仍不全面。根据我

作者简介:张绍军(1974—),男,本科,高级工程师,Email:shaojun.zhang@siemens.com

们多年的实际应用,总结失效原因更多的是来自于过电压。在实际使用中的某些场合和条件下,PWM整流器电路会出现瞬态过电压的情况。瞬态过电压最明显的危害就是击穿器件的绝缘,或者超过了气隙和爬电距离允许最大设计的电压值,导致对设备外壳放电,造成驱动装置故障。即便是出现较低过电压虽不至于立即损坏元器件,但也会使开关元件(如IGBT模块)和母线电容应力加大,带来动态损伤,缩短其使用寿命,降低其可靠性。在 $3\times AC\ 400\ V$ 额定电压的PWM整流器电路中,实际出现的瞬态过电压可达到数kV级别,造成部件的非正常损坏。对于PWM整流器这种新型电力电子产品来说,研究其过电压机理和采取有效的预防措施,是非常必要的。

1 PWM整流器电路瞬态过电压机理

对于过电压现象,从传统角度分析,一般认为来自于“雷击”外部因素或者“甩负荷、切换合闸”等对供电的内部操作^[1],但现场中在出现这种问题的时候往往并没有上述情况发生,无法用上述原因进行解释。PWM整流器电路出现过电压现象,既可能在整流器端,也可能在逆变器端,甚至在电机端,大部分现象无法用“电压反射理论”来解释。过电压瞬间电压超高很容易引起装置器件绝缘击穿或者对外壳放电,前端断路器立即断开,电路断电,修复之后再次上电又一切正常,总体表现为很短时间的瞬态过电压而非持续过电压。因为平常不易测量到这种现象,捕捉现场比较困难,往往可能被误认为是污染物造成短路,这也是造成对PWM整流器电路瞬态过电压机理认识不清的一个重要原因。

综上所述,为了更好地预防这种问题,需要从新的角度来分析这种现象的发生机理。在传统因素之外,对于PWM整流器电路瞬态过电压,主要来自于电路谐振(或者称为电路振荡)。而电路谐振主要来自于两个方面:进线阻抗不匹配和驱动系统寄生电容电感。这两个方面互相影响,都会激发电路谐振,在整流器电路中产生瞬态过电压。前者的因素相对更多一些。

由于存在着电路谐振、电压反射等现象,在PWM整流器电路中引起瞬态过电压的因素较一般工频电路而言要多,总体出现的概率要大,需要采取新的思路进行硬件的配置并采用一些预防措施。

2 电路谐振模型

图2为PWM整流器谐振模型图。

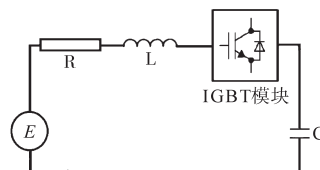


图2 PWM整流器谐振模型

Fig.2 Resonance oscillation model of PWM rectifier

如图2所示的升压型PWM整流器电路谐振模型, E 为电源电压, R 为电路的等效电阻, L 为等效电感, C 为等效电容,IGBT模块内包含IGBT单管和整流二极管,无论IGBT单管或者是二极管,一旦导通可视为导线,电阻可以忽略。因为PWM整流器最大的特点就是控制IGBT导通,在 L 和 C 之间进行充放电并修正电流, L 和 C 之间能量可交换,所以PWM整流器电路在工作中可以近似等效为一个RLC串联电路,其谐振条件为

$$f = f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (1)$$

式中: f 为电源频率; f_0 为电路固有频率。

当发生谐振时,直流母线电容端的电压为^[1]

$$U_c = E \cdot \sqrt{L/C} / R \quad (2)$$

其中, $\sqrt{L/C}$ 为回路的特征阻抗。当回路电阻 R 比特征阻抗小时,电容上即存在超过电源的电压。在实际电路中,当 $R \ll \sqrt{L/C}$ 时,即便 f 和 f_0 不等,但只要两者接近,回路接近于谐振条件, U_c 和 U_L 也会出现瞬态过电压,超过电源电压 E 很多,甚至数倍^[1]。从实际工程现场看,这种谐振过电压最可能会出现在整流器进线端电抗器附近和直流母线上。

3 进线阻抗与基波谐振

进线阻抗以感抗为主,阻抗越大,则电路的固有频率越低。在电路谐振模型中,等效电感 L 不仅仅是电抗器的电感,而是从变压器到整流器端所有的电感之和,包含变压器、母线排、动力电缆、电抗器以及寄生电感等。而等效电容除了驱动组的直流母线电容之外,也包含各种寄生电容。因此仅仅知道了电抗器的电感 L_{inf} 和驱动组的直流母线电容 $C_{DC-link}$,其实还并不能掌握这个电路整体的 L 和 C ,并不掌握电路的固有频率,无法把握是否会出现谐振。换句话说:整流器电路本身不会谐振,但是不能确定放在具体这个环境

里会不会出现谐振。

对于3×AC 400 V的50 Hz电路而言,整流器前端的进线滤波器一般被设计为过滤吸收高次谐波,如3次、5次和7次等,但对50 Hz的基波是不应该也不能过滤的,而如果固有频率在基波附近,则出现进线基波谐振的可能性会大大增加^[2]。现实中,基波的额定电压即为线电压AC 400 V,一旦发生基波谐振,则电抗器之后的整流器进线电压会迅速升高甚至达到数kV以上级别,导致急剧的瞬态过电压发生,直接损坏整流器件如IGBT模块等。从实际情况看,在PWM整流器电路中,进线基波谐振导致过电压的情况是主要的。

进线阻抗与基波是否发生谐振关系密切,如果能检测出整流器前端进线电感和直流母线电容,则可以根据式(1)计算出电路的固有频率,大致掌握是否会出现基波谐振,这对于预防谐振过电压是有利的。如图3例子所示:某型PWM整流器通过控制IGBT的导通,向电网注入特定频率的谐波,根据检测进线端电压和电流的变化计算出相应的电感,计算出进线等效电感为5.958 mH,同时计算出等效直流母线电容为2.42 mF,可以计算出理论的固有频率在42 Hz左右,和进线基波频率50 Hz是比较接近的,那么对于这个PWM电路而言是不够安全的。而在图4的另一个例子中,整流器测量出进线等效电感为0.390 mH,同时计算出等效直流母线电容为5.53 mF,可以计算出理论的固有频率在108 Hz左右,和进线基波频率50 Hz的差距较大,相对比较安全。这两个例子中,前者在反复多次测量中就发现其进线等效电感变化幅度很大,甚至差距几十倍,而后者一直比较稳定,仅有极小的变化。

p3410	整流单元检测方式	[4] 检测并保...	M
r3411[0]	整流单, 检测出的电感-运行1	5.958 mH	M
r3411[1]	整流单, 检测出的电感-运行2	0.001 mH	M
r3412[0]	整流单元, 检测出的直流母线电容...	2.42 mF	M

图3 PWM整流器电路进线电感和直流母线电容(1)

Fig.3 Line supply inductance and DC bus capacitance(1)

p3410	整流单元检测方式	[0] 检测(D)关	M
r3411[0]	整流单, 检测出的电感-运行1	0.390 mH	M
r3411[1]	整流单, 检测出的电感-运行2	0.001 mH	M
r3412[0]	整流单元, 检测出的直流母线电容...	5.53 mF	M

图4 PWM整流器电路进线电感和直流母线电容(2)

Fig.4 Line supply inductance and DC bus capacitance(2)

4 寄生电容和寄生电感的影响

在电路的逆变侧,由于有直流母线电容、电机的电阻和电感,电机动力电缆的电阻,逆变侧也构成RLC串联电路,并有谐振的可能性。在

PWM整流器电路中,整流侧和逆变侧均构成RLC串联电路,可看作是两个共用C的RLC电路的串联,其谐振效应会互相影响。

任何存在PWM波的电路中,来自于动力电缆和电机线圈的寄生电容和寄生电感是不可避免的。这种寄生电容和电感在工频作用下的影响可以忽略不计,但在高频PWM波的作用下却被放大。现实中,寄生电容和电感受到动力电缆长度、是否有屏蔽层、屏蔽连接是否牢固、电机线圈阻抗、电机运行状态及接地质量等多种因素的影响,实际进行准确预测是比较困难的。例如:同样一台力矩速度闭环控制的电机,在静止力矩保持和额定速度转动时,由于PWM波的频率和幅值不同,其动力电缆和电机线圈上体现出来的寄生电容和寄生电感就有很大的不同,而电机的这种工作状态在实际应用中很难准确把握,造成了对寄生效应预测的困难。基于这种原因,这种寄生电容电感可能有时会达到一个比较高的水平,会导致逆变侧谐振电路模型中L和C的大幅度变化,严重影响电路总的固有频率的稳定,因此其作用也绝对不能忽视。如图3所示,其理论计算固有频率在42 Hz左右,如果再考虑实际运行中必然会产生寄生电容电感的影响,则式(1)中的等效电感和等效电容还会继续变化,其实际固有频率和基波频率重合的可能性变大了。

PWM波的作用是产生寄生电容电感的根本原因。三相PWM整流器是可以四象限运行的,既是整流器也是逆变器,最大特点就是无论整流或是逆变,均以输出电压和进线电流的偏差调节信号作为调制波,为了保证电流正弦化和单位功率因数,其直接电流控制信号均以SPWM波的方式发出,进线电流呈现SPWM的特点,因此在PWM整流器的前端,也必然会存在寄生电容电感。即:此时在整流端和逆变端都有寄生电容电感,都会对电路的固有频率产生影响,整流侧和逆变侧的振荡效应互有关联。这一点和传统的二极管整流器电路是不同的。

5 进线阻抗的匹配

从设计上讲,整流器电路的直流母线电容和电抗器电感是匹配的,不可能与基波发生谐振,而高次谐波也被专门设计的滤波器吸收,因此需要进线的阻抗越小越好,这样整流器前端的整体

等效阻抗就会越接近于电抗器本身的电感,越不容易发生基波谐振。而现场的进线阻抗匹配不合适,可能就会引发基波谐振。而要进线阻抗匹配,需要根据进线等效电感、电容和电阻进行计算校验,但由于实际中很难得到这些基本的数据,难度较大。如果驱动装置接入电网后再进行匹配计算,这种顺序则是不正确的。从工程实践角度,直接对进线的短路容量进行规定,使进线显示出强电网的特点,即可以达到阻抗匹配的要求,这种方法简单可行,可以满足实际的工程需求。

强电网表现为短路容量大、电网阻抗小、固有频率高、稳定性高、不易谐振;而弱电网表现为短路容量低、阻抗大、固有频率低、稳定性低、容易发生谐振。

一般地,应该使 S_k (进线电网的短路容量, $kV \cdot A$)和 P_n (整流器额定功率, kW)满足^[2]:

$$\frac{S_k}{P_n} \geq 70 \quad (3)$$

式中:70为一般的倍数要求。

如果同一个进线网络中有若干个PWM整流器,则 P_n 为若干个整流器额定功率的代数和,此时由于同时系数的关系,可以选择下限倍数50。

在一个已经固定的电网中,大功率PWM整流器电路比小功率PWM整流器电路更容易出现谐振过电压,即系统短路容量对大功率PWM整流器额定功率倍数不足的体现,大量实践已经证明了这一点。因此如果进线系统已经成型无法做任何改变,单独给PWM整流器配置一个合适的进线稳压装置(如电力稳压器)也是一个退而求其次的方法,实际效果也比较显著。一般的原则是:该稳压器的视在功率($kV \cdot A$)应该大于等于 $1.27P_n$ (kW),且同时应满足稳压器的短路阻抗 $U_k \leq 3\%$ 。如果设备中还有其它非PWM整流器所带的负载,则要根据其它负载的规定继续加大稳压器的视在功率容量。

6 几种有效的预防措施

除了对进线进行要求和匹配之外,经过现场工程实践验证,以下措施对减少电路谐振引起的过电压也是有效的,且实施比较简单。

6.1 使用带有阻尼电阻的电抗器

普通的电抗器(HF)不带衰减电阻,而适当的阻尼电阻能够衰减进线谐振,避免过电压。实践表明,使用配有衰减电阻的电抗器(HFD)是一个有效的方法。这种电抗器采用双线圈设计,次级

线圈对PE加装适当的衰减电阻,使得电抗器具有较强的阻尼作用,可以有效地抑制对地电压振荡,图5为衰减电阻对谐振衰减的效果对比,经过实际测试,加入阻尼电阻的电抗器对电抗器的输出电压振荡能起到很好的抑制作用。

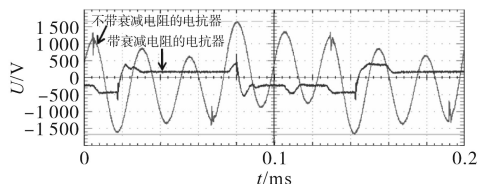


图5 衰减电阻对谐振衰减的效果对比

Fig.5 Oscillation damping comparison of HF and HFD with damping resistor

6.2 配置电阻模块

三相PWM整流器具有馈电功能理论上无需电阻模块,但仍建议配置电阻模块。从理论上讲,直流母线电压超过阈值设置时,整流器会通过控制IGBT的导通向电网反向输入电流实现直流母线降压,但这种方式对于直流母线的振荡过电压会显得反应不够,振荡过电压需要阻尼来迅速衰减。电阻模块具有独立于整流器的直流母线电压监测电路,正常情况下并不起作用,一旦检测发现直流母线达到阈值上限则可以立即通过一个开关管(例如IGBT)在DC+/DC-之间接通一个电阻,通过电阻发热来衰减直流母线的过电压,直流母线电压降低到阈值以下后再断开电阻。电阻模块原理图如图6所示。

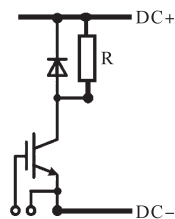


图6 电阻模块原理图

Fig.6 Schematic diagram of the resistor module

6.3 合理布局部件和电缆

由于进线阻抗、寄生电容电感等参数与动力电缆的长度和布局有关,因此要尽可能地缩短动力电缆的长度且不能盘绕,包括设备电柜到变压器的距离以及电柜内部电缆的长度。在设备电柜内,进线滤波器、电抗器和整流器之间,在满足散热的情况下,将其尽可能地靠近安装,使得它们之间的电缆长度尽可能的短且没有盘绕。

6.4 配置合适的电机侧滤波器

由于PWM波作用下寄生效应的不可消除

(下转第41页)

成电机的准确换相。

由图10的A相响应电流波形可以看出,在电机高速转动时,电流波形无较大波动,即拧紧扳手在工作时能够保持较好的稳定性,而在算法的实际执行过程中,系统可以根据响应电流值的大小来完成对应的比较环节,从而实现转子的定位和闭环加速。为了评估系统的稳定性,按照图11所示的负载变化在自同步运转阶段施加扰动。显然,输出转矩在扰动条件下也有较快的响应速度。

4 结论

本文针对BLDCM无位置传感器驱动下的启动过程展开研究,提出一种改进的三段式启动控制方法,具体的结论如下:1)在转子预定位阶段,通过控制电压脉冲的占空比大小避免电机出现反转;2)在电机加速阶段引入检测电压矢量,在提升电机转速的同时保证了换相精度;3)当系统状态达到反电势可检测点后,通过对反电势过零点时间进行修正估计,可达到高精度的换相及转子位置、转速估计效果。

参考文献

- [1] 夏长亮,方红伟.永磁无刷直流电机及其控制[J].电工技术学报,2012,27(3):25-34.
- [2] 梁伟.单相无刷直流电机及其无位置传感器控制系统研究[D].杭州:浙江大学,2014.

- [3] 陈炜,刘会民,谷鑫,等.基于反电动势函数的无刷直流电机无位置传感器控制方法[J].电工技术学报,2019,34(22):4661-4669.
- [4] 杨明,刘杰,徐殿国.重载条件下无刷直流电机无位置传感器驱动换相续流影响的分析及其补偿[J].中国电机工程学报,2013,33(30):106-112.
- [5] 倪有源,陈浩,何强,等.无位置传感器无刷直流电机三闭环控制系统[J].电机与控制学报,2017,38(11):62-69.
- [6] 李自成,程善美,蔡凯.基于线间反电动势的无刷直流电机转子位置估算[J].电气传动,2008,4(21):17-20.
- [7] Chen H C, Liaw C M. Current-mode control for sensorless BDCM drive with intelligent commutation tuning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(5): 747-756.
- [8] 王欣,梁辉,秦斌.基于OSELM的无刷直流电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报,2018,22(11):82-88.
- [9] Tursini M, Petrella R, Parasiliti F. Initial rotor position estimation method for PM motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1630-1640.
- [10] Shao J, Nolan D, Teissier M. et al. A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1734-1740.
- [11] 李明辉,马建民.永磁同步曳引机转子初始位置检测[J].电气传动,2017,47(4):7-10.
- [12] Kim T H, Ehsani M. Sensorless control of BLDC motors from near-zero to high speeds[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(6): 1635-1645.
- [13] 喻锋,王西田.基于冒泡原理的模块化多电平换流器快速电压均衡控制策略[J].电力自动化设备,2015,35(9):81-86.

收稿日期:2020-05-19

修改稿日期:2020-08-14

(上接第13页)

性,对于必须使用的较长的电机动力电缆,可以在逆变器和电机之间配置合适的输出电机侧滤波器,既可以衰减电压反射引起的过电压,也可以增大逆变侧的阻尼,减少谐振效应。

7 结论

由于三相PWM整流器电路的振荡电路效应作用,因此电路中瞬态过电压更多地是来自电路谐振,特别是进线基波谐振。这和传统的二极管整流器电路有很大的不同,这也是造成PWM整流器功率器件失效的主要原因之一,因此应该引起足够的重视,并采取有效措施尽可能消除引起谐振的因素。

在引起谐振的因素中,进线阻抗匹配的因素对谐振效应影响最大,其次是电路中寄生电容电

感的影响。在实际的应用中,硬件配置需要注意上述因素,并对设备现场的进线指标做出一些具体的要求,使得进线阻抗匹配合理。实践证明,注意了上述因素并采取有效措施,可以很好地预防过电压现象,大大降低PWM整流器电路瞬态过电压的发生,更好地体现三相PWM整流器的优点。

参考文献

- [1] 程浩忠,艾芊,张志刚,等.电能质量[M].第2版.北京:清华大学出版社,2017.
- [2] SIEMENS AG. SINAMICS low voltage engineering manual[M].德国:SIEMENS,2015.

收稿日期:2020-03-22

修改稿日期:2020-04-28