

基于 NCAV 和电路等效替换的 PWM 整流器容错控制系统

秦 伟, 冯延晖, 黄 凯, 邱颖宁

(南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要:三相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)整流器因其具有可控的功率因数、网侧三相电流趋于正弦、直流侧电压稳定等优点,在电机控制、风力发电并网、柔性直流输电和微电网等领域得到广泛应用。为了提高三相 PWM 整流器可靠性,文中提出了一种 PWM 整流器容错控制系统,该系统结合了归一化电流平均值(normalised current average value, NCAV)故障检测法和基于电路等效替换的容错方法。该控制系统在功率开关管单管开路故障情况下能够实现故障检测和诊断,并进行快速的容错控制,从而减少单管开路故障对系统造成的影响,改善故障下三相电流波形,减小输出电压纹波,提升系统的整体性能和可靠性。通过仿真验证了该控制系统的有效性。

关键词:整流器;开路故障;故障诊断;容错控制

中图分类号: TM461

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)06-0084-06

0 引言

三相电压型脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)整流器(voltage source rectifier, VSR)具有输入电流正弦性好、单位功率因数运行、能量双向流动、谐波含量低等特性,在电机控制、风力发电系统、柔性直流输电领域应用广泛。这也使得三相 VSR 成为了电能变换领域和电力电子技术中具有重要意义研究对象^[1,2],其可靠性问题是当前研究的重点。为了有效地提高三相 VSR 的可靠性,针对功率开关管故障的变流器故障诊断技术和容错控制技术已经成为国内外学者研究的热点^[3-6]。文献[7]提出了一种归一电流法,该方法能够有效地检测出整流器中开关管的故障,但对于系统发生故障后如何有效降低故障对系统的影响并没有做深入研究。文献[8]和文献[9]提出了一种基于空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)信号补偿来完成容错控制的方法,实现了很好的控制效果,但该方法并没有结合故障诊断算法,没有完成对三相 PWM 整流器系统的动态故障诊断并实现容错控制。

文中将归一化电流平均值(normalised current average value, NCAV)故障检测算法和基于电路等效替换的容错算法相结合,提出一种 PWM 整流器容错控制系统,通过 NCAV 故障检测算法检测并定位功率开关器件开路故障,将正常状态下 SVPWM

收稿日期:2017-07-10;修回日期:2017-08-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505225);江苏省自然科学基金资助项目(BK20131350);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30915011324)

算法切换到容错 SVPWM 算法,能够降低故障对系统的影响,有效提高三相 PWM 整流器可靠性。

1 NCAV 故障诊断方法

NCAV 在逆变器开路故障诊断领域首先得到应用^[10],该方法将三相电流平均值归一化,通过对比诊断变量在正常状态和故障状态的变化,实现对功率开关管诊断以及故障开关管的定位。文献[11, 12]中通过重新设计 NCAV 诊断变量得到改进,通过计算改进后的附加变量,增强了方法对误诊断的鲁棒性,同时提供了多故障诊断的能力。该算法的框图如图 1 所示。

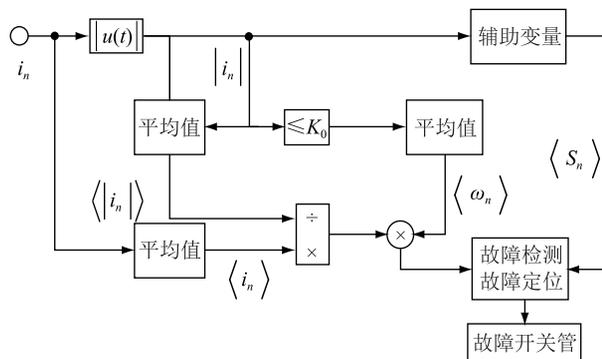


图 1 NCAV 方法计算框图

Fig.1 Block diagram of the NCAV method

从三相电流 i_n 得到主要的诊断变量 r_n :

$$r_n = \omega_n \frac{i_n}{|i_n|} \quad (1)$$

$$\omega_n = \begin{cases} 1, & |i_n| < K_0 \\ 0, & |i_n| \geq K_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:下标 n 表示相位符号(包括 a, b 和 c); i_n 为三

相电流平均值; $|i_n|$ 为三相电流平均值的绝对值; K_0 为阈值门槛值, 经验上选择额定三相电流值的 5% 来作为 K_0 。

当功率开关管发生故障时, 故障相位的输出电流所对应的变量 ω_n 变化明显, 使得诊断变量 r_n 同时产生相应的变化, 进而完成对开关管的诊断以及故障开关管的定位。

当整流器同一个桥臂上的功率开关管同时出现故障时, 对应故障相的 $|i_n|$ 接近于 0。此时, 变量 r_n 无法实现对功率开关管的诊断。为了能够识别这一类故障, 定义附加的辅助变量为:

$$S_n = \frac{2|i_n|}{|i_l| + |i_m|} \quad (3)$$

式中: $l, m, n \in \{a, b, c\}$, $l \neq m \neq n$ 。

S_n 中的电流值比较低的那一相就是故障开关管所处的相。由式(1)和式(3)可以得到变量 r_n 和 S_n , 通过将其与阈值 K_r 和 K_s 进行比较, 能够诊断并定位故障功率开关管。

2 电路等效替换容错算法

开关管是整流器中最易发生故障的部件^[13,14]。常见的功率开关管包括功率开关管的短路故障和开路故障 2 部分。功率开关管发生短路故障时, 可以通过控制电流反馈环对电流的限制作用降低其对系统的影响。故障时快速熔断器的保护, 可以实现故障的隔离。另外, 也可以在变流器的单个桥臂上串联 2 个快速熔断器, 将此类故障转化为开路故障。功率开关管发生开路故障时, 系统往往会继续运行, 如果长时间在该状态下运行会对系统造成二次伤害。

对于三相 PWM 整流器来说, 在整流桥中有 6 个开关管, 出现的开路故障模式有 63 种, 然而在工业环境中, 单个开关管开路故障发生频次最高, 其他情况发生概率极低, 故文中主要讨论单管开路故障。

2.1 故障分析

整流电路的结构图如图 2 所示, 在正常运行过程中三相交流电的相电压在一个周期内脉动 3 次, 线电压在一个周期内脉动 6 次。将线电压脉冲区间分为 6 个区域, 如图 3 所示。在不同的区域内对应着三相电压不同的相位关系, 且将 6 个电压区间通过克拉克(Clarke)变换从三相静止坐标系变换到两相静止坐标系。可以发现这 6 个区域脉动次序与电压型整流器做 SVPWM 扇区计算时的旋转方向是保持一致的。

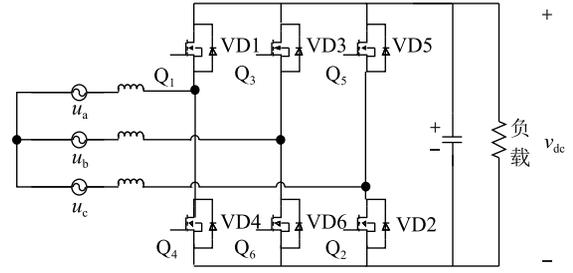


图 2 整流电路拓扑

Fig.2 Rectifier circuit topology

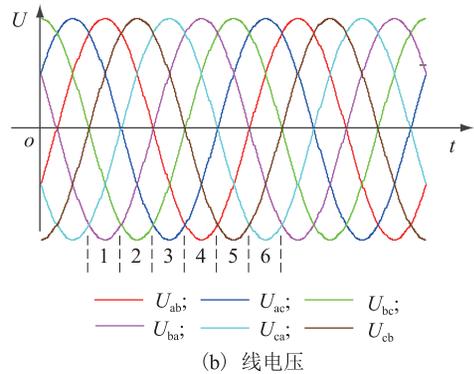
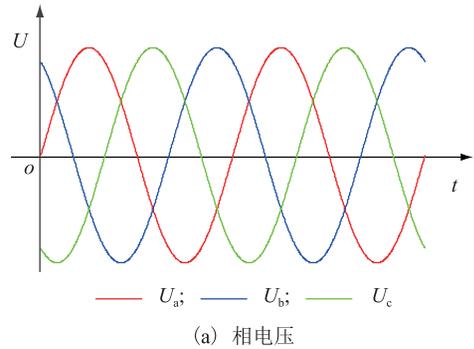


图 3 三相交流电的相电压和线电压

Fig.3 Phase voltage and line voltage of three phase AC

例如, 图 2 中第一区域 a 相电压的相角为:

$$\theta_{ua} \left(\frac{\pi}{6} < \theta_{ua} < \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

可知进行 Clarke 变换时, 相角为 θ , 有:

$$\theta = \arctan \left(-\frac{1}{\tan \theta_{ua}} \right) \quad (5)$$

计算可得 $-60^\circ < \theta < 0^\circ$, 图 4 标明了 U_α, U_β 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的基本电压空间矢量图的对应位置。第一区域对应图 4 中的第 VI 扇区(扇区计算值为 2)。同理, 也可以推出来其他区域的对应关系。

对图 2 中的第一区域进一步分析, 在第一区域内, U_{ab} 的值最大, 在三相负载平衡的情况下, 在 a, b 两相中流经的线电流值大于在 c 相中相电流的值。那不妨考虑一种极端情况, 即 c 相负载开路, 此时, 可将电路等效为图 5 所示电路。

为了防止同一个桥臂上下开关管同时导通造

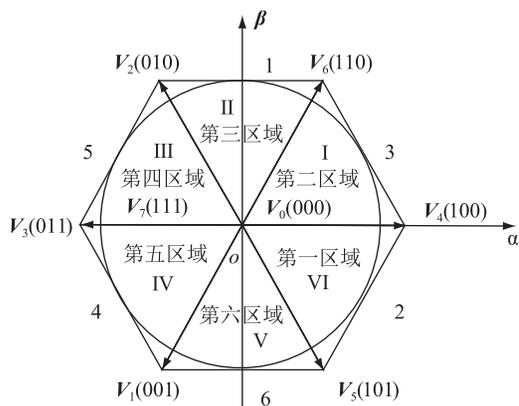


图4 基本空间矢量

Fig.4 Basic space vector

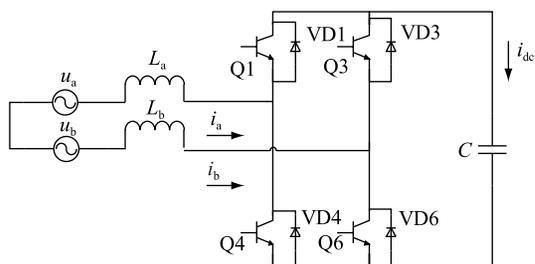


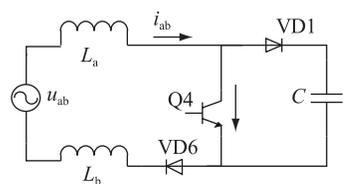
图5 第一区域内整流电路等效电路

Fig.5 The equivalent circuit of rectifier circuit in the first area

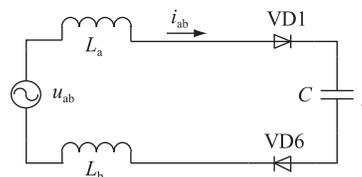
成短路,烧坏元器件,同一桥臂上下开关管设置了互锁,即当上桥臂开通时,下桥臂必须断开。当上桥臂导通时,记其状态量为1,关断时为0。在图2中有8种开关管状态,即000,001,010,100,110,101,110,111。当c相负载开路后,在第一区域内的等效电路图5中,开关管有4种工作状态,即00,01,10,11。等效电路在第一区域内不同开关模式下的工作情况如图6所示。

从图6中可以得出,在第一区域内,Q3和Q4主要功能是完成对电感的充电,当Q4或者Q3发生故障时,可以通过使能另一个等效开关管完成对电感的充电。当Q3或Q4开关管故障时,无法达到01状态完成放电,此时,电感的放电过程可以通过导通10电路来完成。在硬件电路中,开关管的导通关断有死区时间,在死区时间内,同一个桥臂的开关管同时关断,其等效电路为10状态所示电路,同样也可以补偿电感放电的时间。

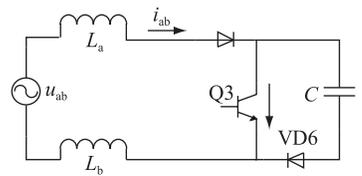
Q1和Q6的主要功能是完成对电容放电,当Q1或Q6发生故障时,电流仍可以通过续流二极管完成放电。这样的基于电路图的等效替换不但能够达到短时整流器容错的目的,而且能够充分应用健康开关管,但是对其他开关管的使用频率和损耗也会成倍的增加。



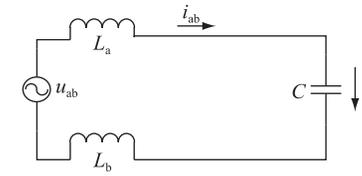
(a) 00状态



(b) 10状态



(c) 11状态



(d) 01状态

图6 在第一区域内不同开关模式下的工作原理

Fig.6 Schematic diagram of different switching modes in the first area

2.2 容错控制

图3(b)中每个区域对应的等效开关以及作用元器件如表1所示。

表1 线电压区域及等效开关和作用元件对应表
Table 1 Line voltage region, equivalent switch, and corresponding components table

区域 i	电压 U	作用电感 L_m	作用电感 L_n	等效开关管 Q_x	等效开关管 Q_y	作用二极管 VD_d	作用二极管 VD_q
1	U_{ab}	L_a	L_b	Q4	Q3	VD1	VD6
2	U_{ac}	L_a	L_c	Q4	Q5	VD1	VD2
3	U_{bc}	L_b	L_c	Q6	Q5	VD3	VD2
4	U_{ba}	L_b	L_a	Q6	Q1	VD3	VD4
5	U_{ca}	L_c	L_a	Q2	Q1	VD5	VD4
6	U_{cb}	L_c	L_b	Q2	Q3	VD5	VD6

不失一般性,假设开关管Q1发生开路故障,由表1可知,Q1在第四区域和第五区域起作用,而它在这2个区域等效开关管分别为Q6和Q2,这2个线电压区域对应SVPWM矢量图中的第III扇区和第IV扇区。在第四区域内,由表1可知,在电路中作用的矢量为 $V_0(000)$, $V_2(010)$, $V_3(011)$, $V_7(111)$,对

应不同开关模式下的等效电路图,可知,整流电路在第四区域正常工作时,会在 V_0, V_3 和 V_7 作用下完成充电过程,在 V_2 作用下完成放电过程。当开关管 Q1 故障时,会影响 V_7 作用下对直流母线电容的充电过程,不影响放电过程。在第五区域内,由表 1 可知,在电路中作用的矢量为 $V_0(000), V_1(001), V_3(011), V_7(111)$, 对应不同开关模式下的等效电路图,可知,整流电路在第五区域正常工作时,会在 V_0, V_3 和 V_7 作用下完成充电过程,在 V_1 作用下完成放电过程。当开关管 Q1 故障时,会影响 V_7 作用下对直流母线电容的充电过程,不影响放电过程。可以看出,当 Q1 开关管故障产生后主要影响矢量 $V_7(111)$, 所以只需要对矢量进行补偿即可。

通过控制 SVPWM 的算法以抵消由于 Q1 发生开路故障引起的三相电流不平衡。在线电压的第四区域里,通过控制开关管 Q6 完成对电感的两次充电过程的,这里以线电压的第四区域为例,在其对应的 SVPWM 矢量图的第 III 扇区里,控制方式可以分解为 V_2 和 V_3 2 个作用矢量以及 2 个零矢量 V_0 和 V_7 。正常的七段式作用方式为:

$$000-010-011-111-011-010-000$$

$$V_0-V_2-V_3-V_7-V_3-V_2-V_0$$

当 Q1 发生开路故障,进行容错控制之后的控制信号可以分解为 V_2 和 V_3 以及零矢量 V_0 , 其控制方式为:

$$000-010-011-000-011-010-000$$

$$V_0-V_2-V_3-V_0-V_3-V_2-V_0$$

图 7 给出了每个矢量的作用时间,可以清晰地对比容错算法开始前后脉冲信号的变化。针对不同的开关管故障,通过对开关管主要的作用区域内

的故障矢量进行补偿,可以达到容错的目的。在上桥臂的开关管故障中对矢量 $V_7(111)$ 进行补偿,在下桥臂的开关管故障中对矢量 $V_0(000)$ 进行补偿。

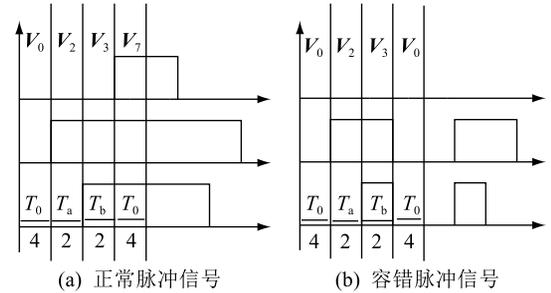


图 7 脉冲信号的变化

Fig.7 Pulse signal changes

3 MATLAB 仿真实验

为验证提出的整流器容错控制系统的正确性和有效性,在 Matlab 中建立 PWM 整流器仿真模型,文献[15-17]阐述了一种整流器的控制策略,能够使整流器直流电压保持稳定,保持输出最大有功功率。最大有功功率控制系统图如图 8 所示。其设置的仿真参数即电网正序基波线电压为 $470 \angle 0^\circ \text{V}$, 滤波电感 L_s 为 1 mH, 线路损耗 R_s 为 10Ω , 直流给定电压 1300 V, 直流侧接 100Ω 纯电阻负载。通过控制 IGBT 的门极控制信号,来控制功率开关管发生开路故障的时间,模拟开关管 Q1 发生信号缺失故障。仿真时间为 1.5 s, 0.5 s 前系统正常运行; 0.5 s 时,引入 Q1 管开路故障, 1 s 时加入 Q1 管开路故障的容错算法。对比离线容错控制和在线容错控制 2 种状态下电路参数的变化。

图 9 为 PWM 整流器 2 种容错控制模式下的三相电流波形图。图 9(a) 给出了离线容错控制模式

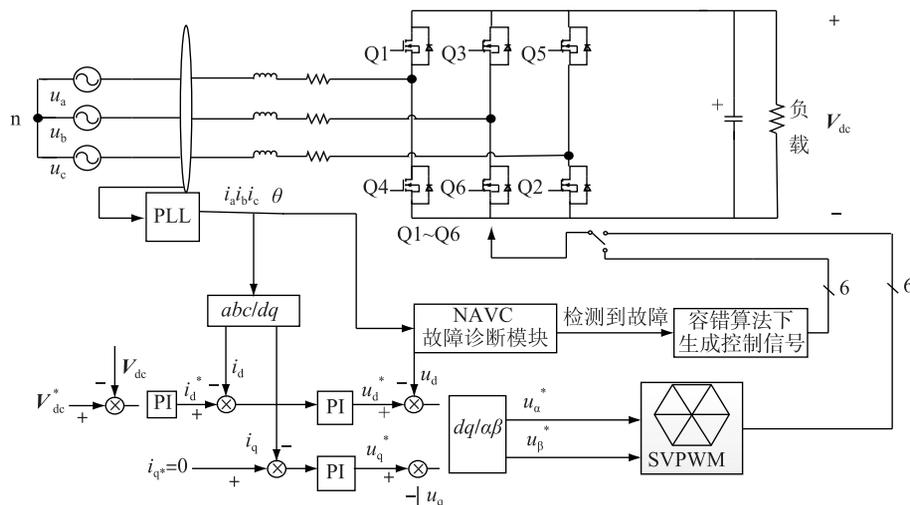


图 8 三相 PWM 整流器的容错控制系统框图

Fig.8 Block diagram of the proposed fault-tolerant control of a three-phase PWM converter

下系统网侧三相电流,可见,当功率开关管 Q1 发生故障时三相电流发生明显畸变,幅值增加,从而影响整个 VSR 整流器系统性能。图 9(b)为在线容错控制下网侧三相电流波形,可以得出,NCAV 故障检测算法能够准确检测并定位到故障开关管,及时切换到容错算法下,能够有效避免三相电流发生长时间畸变,减小开路故障对整个系统的影响。

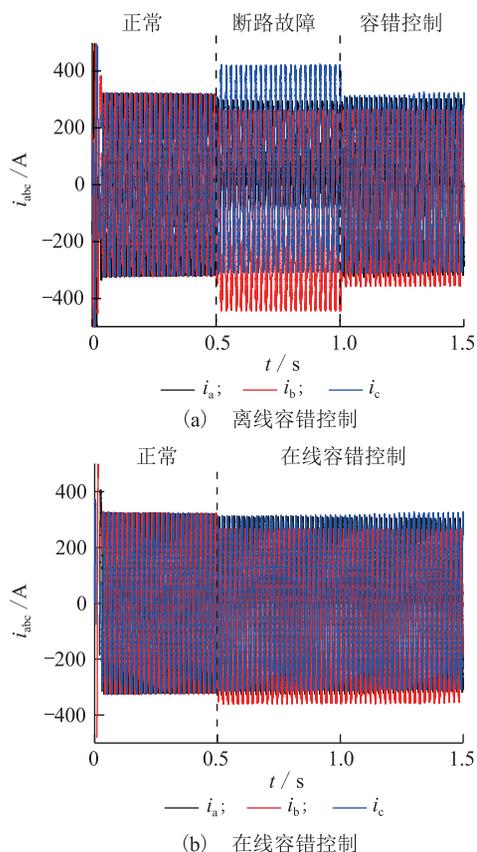


图 9 PWM 整流器三相电流波形

Fig.9 The three-phase current of PWM converter

图 10 为 2 种容错控制系统下的整流器直流侧电压。可见在离线容错控制时,当 Q1 管发生开路故障时,直流电压纹波明显加大,容错之后纹波减小。在线容错控制能够在 Q1 管故障时及时将正常的 SVPWM 算法切换到容错控制算法,能够减小开路故障持续时间,避免电压纹波大幅度增加。图 11 为 NCAV 故障诊断变量值的变化,Q1 在 0.5 s 时发生开路故障,0.001 433 s后,NCAV 诊断出 Q1 管发生故障并将定位信号输送给下一级,选择对应故障开关管的容错程序从而完成容错控制。验证故障诊断算法的准确性和及时性。图 12 为三相 VSR 系统在正常、Q1 开路故障和加入 Q1 管开路故障容错控制条件下的电流轨迹圆图,正常工作状态下,三相电流的品质接近正圆,电能品质良好;Q1 管发生开路故障后,电能品质开始下降,在加入容错控制算

法后,电流轨迹圆向正常工作时的电流轨迹圆靠近。结果表明该容错控制算法能够改善由 Q1 管开路故障引起的电能品质下降。

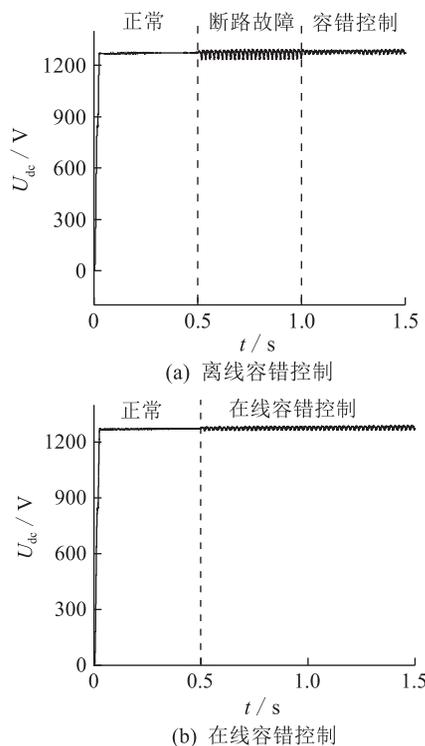


图 10 PWM 整流器直流侧电压

Fig.10 DC side voltage of PWM rectifier

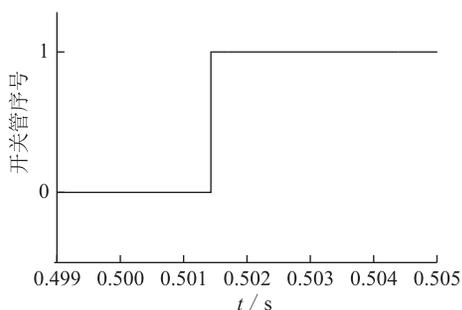


图 11 NCAV 算法故障诊断量

Fig.11 NCAV algorithm fault diagnosis variable

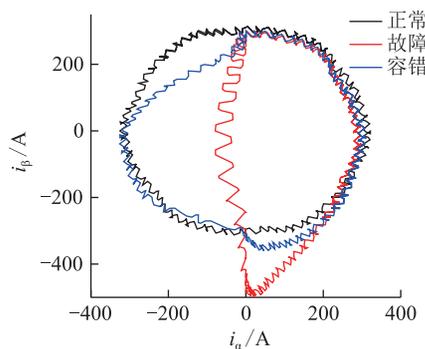


图 12 正常、故障和容错的电流轨迹圆

Fig.12 Normal, faulty and fault tolerant current trajectory circle

4 结论

通过 MATLAB 仿真验证了文中提出的容错控制系统的有效性与及时性,该容错控制系统可以不改变整流器系统拓扑结构实现软件容错,能够有效降低开关管开路故障给整个三相 VSR 系统带来的影响。这种方法无论是在海上风电还是柔性直流输电的恶劣环境下都能够远距离对整流器系统进行容错控制,可以有效降低系统二次事故的发生,减少经济损失。然而,故障检测算法的响应时间还是很长,从电流圆轨迹图可以看出,容错算法还有很大的改善空间,需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张兴,张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.
ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. PWM rectifier and its control [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2012.
- [2] 张莉,刘天羽,李如明,等. 电压型 PWM 整流器控制研究[J]. 电源世界, 2015(11): 21-26.
ZHANG Li, LIU Tianyu, LI Ruming, et al. Research on control of voltage source PWM rectifier [J]. Power world, 2015(11): 21-26.
- [3] QIU Yingning, JIANG Hongxin, FENG Yanhui, et al. A new fault diagnosis algorithm for PMSG wind turbine power converters under variable wind speed condition [J]. Energies, 2016, 9(7): 548.
- [4] KIM D E, LEE D C. Fault diagnosis of three-phase PWM inverters using wavelet and SVM [J]. Journal of Power Electronics, 2009, 9(3): 329-334.
- [5] QIU Yingning, FENG Yanhui, SUN Juan, et al. Applying thermophysics for wind turbine drivetrain fault diagnosis using SCADA data [J]. Iet Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 661-668.
- [6] KAMEL T, BILETSKIY Y, CHANG L. Fault diagnoses for industrial grid-connected converters in the power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(10): 6496-6507.
- [7] ESTIMA J O, FREIRE N M A, CARDOSO A J M. Recent advances in fault diagnosis by Park's vector approach [C] // Electrical Machines Design Control and Diagnosis. IEEE, 2013: 279-288.
- [8] IM W S, KIM J M, LEE D C, et al. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1539-1547.
- [9] 王新帅. 一种基于空间矢量的整流器容错控制方法[D]. 天津:天津理工大学, 2015.
WANG Xinshuai. A fault-tolerant control method of rectifier based on spaceVector [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.
- [10] ABRAMIK S, SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, et al. A diagnostic method for on-line fault detection and localization in VSI-fed AC drives [C] // European Conference on Power Electronics and Applications. 2003: 2-4.
- [11] SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, CICHOWSKI A. Open-transistor fault diagnostics in voltage-source inverters by analyzing the load currents [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4681-4688.
- [12] FREIRE N M A, ESTIMA J O, CARDOSO A J M. Open-circuit fault diagnosis in PMSG drives for wind turbine applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3957-3967.
- [13] 江红鑫. 直驱型风力发电机组变流器系统可靠性研究[D]. 江苏:南京理工大学, 2016.
JIANG Hongxin. Research on reliability of full power converter for permanent magnet direct-driven wind turbine [D]. Jiangsu: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [14] IM W S, KIM J S, KIM J M, et al. Diagnosis methods for IGBT open switch fault applied to 3-phase AC/DC PWM converter [J]. Journal of Power Electronics, 2012, 12(1): 120-127.
- [15] 郝鹏. 混合多馈入直流输电系统中 VSC-HVDC 的控制策略研究[D]. 辽宁:东北大学, 2014.
GAO Peng. The control strategy of VSC-HVDC in hybrid multi-infeed HVDC system [D]. Liaoning: Northeastern University, 2016.
- [16] 刘志江,夏成军,杜兆斌. 多端柔性直流输电系统直流电压模糊控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 21-26.
LIU Zhijiang, XIA Chengjun, DU Zhaobin. Research of DC voltage fuzzy control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 21-26.
- [17] 徐政,张哲任,刘高任. 柔性直流输电电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1): 54-59.
XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 54-59.

作者简介:



秦伟

秦伟(1994—),男,河南永城人,硕士研究生,主要研究方向为风力发电系统变流器故障诊断及容错控制(E-mail: qinwei986@126.com);

冯延晖(1977—),男,广东广州人,博士,副教授,主要研究方向为风力发电系统的测量与诊断技术,风电场经济学(E-mail: yanhui.feng@njust.edu.cn);

黄凯(1993—),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为风力发电系统变流器的故障诊断(E-mail: huangkai807@njust.edu.cn);

邱颖宁(1977—),女,广东广州人,博士,副教授,主要研究方向为新能源科学与工程,风力发电机故障诊断与可靠性,光伏系统设计(E-mail: yingning.qiu@njust.edu.cn)。

(下转第 131 页)

Analysis and Treatment of Partial Discharge Abnormal Signal in 252 kV GIS Equipment

SHI Jinglei¹, SONG Yunxiang², YANG Jinggang¹, WANG Chen¹, XIAO Lei¹

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: As an effective partial discharge detection technology, UHF detection technology has been widely used in GIS detection. In the live detection process, the UHF abnormal signal is detected on a 252 kV GIS basin-type insulator. An X-ray detection was performed to the basin-type insulator, and several centimeters long pores are found inside. The results are consistent with the detection and positing of UHF method. However, the power frequency withstand voltage test and partial discharge test by pulsed current method to the basin-type insulator can meet the requirement of the factory test, indicating that the traditional detection method has its own limitations. In view of this situation, some suggestions are put forward, such as the extra high frequency partial discharge detection of basin-type insulators before leaving the factory, so as to improve the outgoing quality of the basin-type insulators.

Key words: GIS; live detection; UHF; disintegration; defect analysis

(编辑 方 晶)

(上接第 89 页)

Fault-tolerant Control System of PWM Rectifier Based on NCAV and Circuit Equivalent Replacement

QIN Wei, FENG Yanhui, HUANG Kai, QIU Yingning

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier is widely used in motor control, wind power generation, flexible HVDC and micro grid due to the controllable power factor, sinusoidal grid side three-phase current waveform, stable DC side voltage and so on. In order to improve the reliability of three-phase PWM rectifier, a PWM fault-tolerant control system based on NCAV fault detection method is proposed in this paper. The control system can implement fault-tolerant control in a short time in the case of an open circuit fault has occurred on a single power switch, reduce the impact to the system caused by the single open circuit fault. This system can effectively improve the three-phase current waveform, reduce the output voltage ripple and enhance the overall system performance and reliability when an open circuit fault has occurred on a single power switch. The usefulness of this paper is verified through simulation results.

Key words: rectifier; open-circuit fault; fault diagnosis; fault-tolerant control

(编辑 钱 悦)

(上接第 126 页)

Mechanism Analysis and Experimental study of Transmission Line Tree-related Failures

LIU Zhenyao¹, TAN Fali², KANG Yubin¹, SONG Ziqiang², GUO Rong¹, HU Feng²

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Nanjing 211102, China;
2. Wuhan SunShine Power Science&Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Tree-related failure is a typical non lightning fault on transmission lines. Current researches mainly focus on the diagnosis and treatment, while the mechanism study is seldom reported. Firstly, the formation process of tree-related failure and the typical discharge characteristics in different stages of tree height are analyzed, and then different phases of tree-wire gap discharge process are simulated in the lab environment. The discharge current is monitored, and the characteristics of the waveform and the frequency spectrum are analyzed. Characteristics and rules of tree-wire discharge at different stages are obtained, and the mechanism of transmission line tree-related failures is further expounded.

Key words: Tree-related failure; discharge; spectrum analysis; current waveform

(编辑 江 林)