

DOI: 10.7667/PSPC180455

基于电流预测的矩阵变换器过流保护策略研究

马星河¹, 王昆朝¹, 许丹¹, 魏磊²

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对矩阵变换器在实际运行中出现负载电机过载导致过电流的问题, 提出了一种基于电流预测的过流保护策略。该策略利用变换器系统的离散时间模型来预测由矩阵变换器生成的所有27个可能的输出电压矢量的输出电流的未来值。然后将预测的输出电流未来值与保护阈值电流相比较, 当预测电流值大于保护阈值电流时, 系统会立即向控制器发送过电流报警信号来控制变换器开关器件的关断, 进而保护功率开关器件与负载电机免受故障的损害。最后通过 Matlab/Simulink 仿真与实验, 证实了这种过流保护策略的有效性。

关键词: 矩阵变换器; 电流预测; 过流保护; 负载电机; 开关器件

Research on overcurrent protection strategy of matrix converter based on current prediction

MA Xinghe¹, WANG Kunchao¹, XU Dan¹, WEI Lei²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;

2. XJ Electric Limited Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: Considering the problem of overcurrent caused by load motor overload during actual operation of matrix converter, an overcurrent protection strategy based on current prediction is proposed in this paper. The strategy uses the discrete-time model of matrix converter system to predict future values of the output currents for all the 27 possible output voltage vectors generated by matrix converter. Then, comparing the predicted future output current with the protection threshold current, the system will immediately send an overcurrent alarm signal to the controller to control the switch off of matrix converter switch device when the predicted current value is greater than the protection threshold current. And it protects the power switch device and the load motor from the damage of the fault. Finally, the effectiveness of this overcurrent protection strategy is verified by Matlab/Simulink simulation and experiment.

This work is supported by Natural Science Foundation of Henan Province (No. 182300410280), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600906) and National Natural Science Foundation of China (No. U1404522).

Key words: matrix converter; current prediction; overcurrent protection; load motor; switching device

0 引言

功率半导体和微处理器行业的发展与进步不仅在很大程度上减少了矩阵变换器的体积和重量, 而且还大大提高了它的整体性能。矩阵变换器作为一种高性能的交-交变频设备, 要实现在工业实际中的成熟应用, 其完善的保护是必不可少的^[1-2]。矩阵变换器的保护研究也是其本身走向实际应用必须要解

决的关键技术之一。因其负载多为电动机, 而当电动机过载时会产生过电流, 它会引起电动机发热以及开关器件结温升高, 如果持续时间过长则会导致电动机受损以及器件的损坏^[3-8]。因此, 需要一种过流保护策略来解决这一问题。因矩阵变换器中不存在自由续流回路, 故传统的保护措施是加入一个二极管箝位电路^[9-10]为其提供续流通路。但此策略是在负载过载出现过电流之后才采取的措施, 这样会对箝位电路造成损害, 使其寿命减短。文献[11]提出了一种过载时快速关断策略, 但是该策略处理比较复杂, 而且在过载后的输出侧波形不是理想的正弦波形。

基金项目: 河南省自然科学基金项目资助(182300410280); 国家重点研发计划课题(2016YFC0600906); 国家自然科学基金项目资助(U1404522)

本文基于对输出电流值的预测提出一种新的过流保护策略。该保护策略利用矩阵变换器系统的离散时间模型来预测由矩阵变换器生成的所有 27 个可能的输出电压矢量的输出电流的未来值。通过将预测输出电流的未来值与保护阈值电流相比较, 当预测电流值大于参考电流值时, 系统会立即向控制器发送过电流报警信号来控制变换器开关器件的关断, 从而保护负载电机以及开关器件免受损坏。该保护策略不仅避免了因检测到过流信号才采取相应措施这段时间对箝位电路造成损害, 而且还加快了

负载电动机能量的释放。

1 矩阵变换器的箝位电路保护

矩阵变换器包括 9 个具有关断功能的双向开关的组合, 依据相应的调制方法控制 $S_{11} \sim S_{33}$ 9 个双向开关开断可以将 3 个输出相中的每一个连接到 3 个输入相中的任何一个^[12-14]。它和传统的交-直-交变换器不一样, 其本身没有续流回路, 二极管箝位电路就很好地充当了续流通道这一重要角色。图 1 为带有二极管箝位保护电路的矩阵变换器拓扑图。

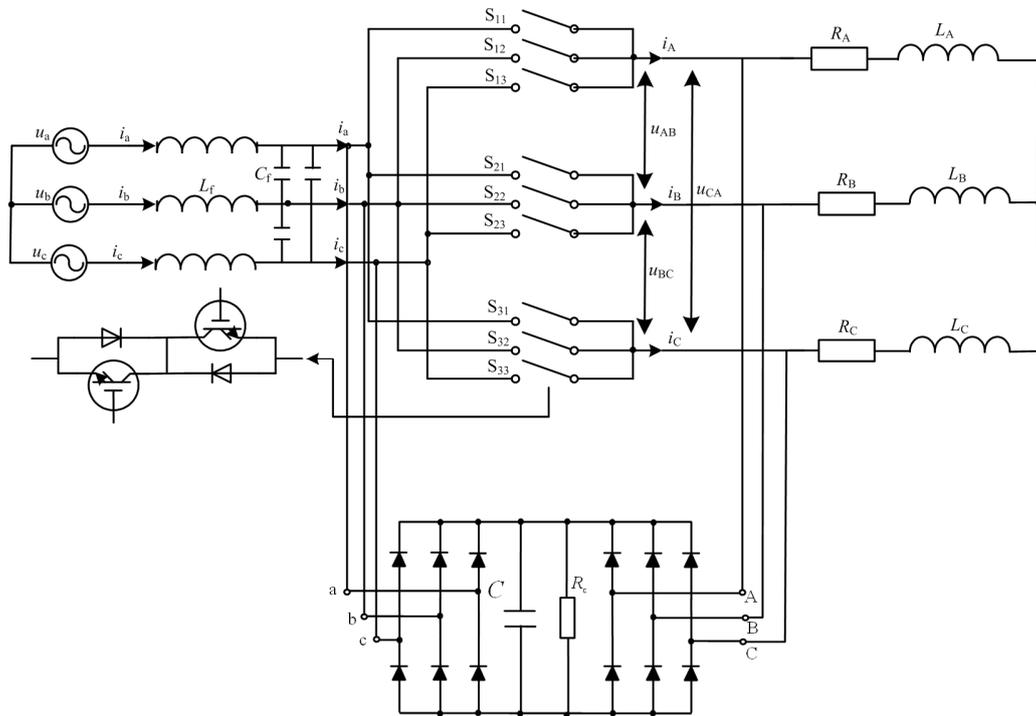


图 1 带有二极管箝位保护电路的矩阵变换器拓扑图

Fig. 1 Topology of matrix converter with diode clamping protection circuit

图中 L_f 、 C_f 构成了输入 LC 滤波器, $S_{11} \sim S_{33}$ 是 9 个一般的 IGBT 共集电极式结构的双向开关。二极管箝位保护电路位于矩阵变换器的输入侧与输出侧之间, 由两个采用快速恢复二极管形成的整流桥和两端并联有一个吸收电阻 R_c 的箝位电容构成, 并联 R_c 的主要目的是负责释放能量^[15]。

二极管箝位保护电路和传统交-直-交型变换器中的二极管续流回路的工作机理是一样的, 若开关换流控制不当或是换流过程失败, 那么二极管箝位电路可以为输出侧储存的能量提供很好的流通道, 从而避免换流不当造成的故障将开关器件击穿^[16-17]。当发生负载过载时, 一旦检测到存在过电流后, 系统会向矩阵变换器的主控制器发出一个过流报警信号, 其主控制器根据过流报警信号立即停止给所有

的开关器件发送脉宽调制 PWM 脉冲, 这样就及时关断了所有的功率开关器件。接着负载侧储能经由箝位电路与电源侧连接形成回路, 能量会在箝位电路上被释放, 以此来保护开关器件与负载电动机使其免遭损坏。因此, 故障情况下二极管箝位电路吸收剩余能量的能力是设计时应考虑的重点。电容值可由式(1)^[18]确定。

$$\frac{3}{4} \times L \times i_{\max}^2 = \frac{1}{2} C \times (U_{\max}^2 - U_{c0}^2) \quad (1)$$

式中: i_{\max} 为过流保护被触发时的电流值; 负载为电动机时, L 为电动机的总漏感; C 为箝位电路的电容量; U_{\max} 为允许的最大过压; U_{c0} 为正常情况下电容上的电压, 即输入线电压的幅值。正常工作的情况下电容所承受的是输入线电压的幅值。可见, 电容 C 的参数与负载电感(电动机的漏感)、矩阵变

换器的输出电流极限值以及电容的额定电压值有关。

2 基于电流预测的矩阵变换器过流保护策略

2.1 矩阵变换器输出电流的预测

假定矩阵变换器由频率为 ω 的三相平衡系统供电,并且考虑到它使用输入 LC 滤波器连接到电源,则输入相之间不得短路,并且由于存在电感负载,输出电流不能中断。根据上面所说的约束条件,可以得到 27 种不同的开关组合。

可以使用具有表示每个双向开关的状态(如果开关 S_{ij} 关闭,则 $S_{ij} = 0$,否则 $S_{ij} = 1$)的 9 元素开关矩阵来表示输出电压(u_A, u_B, u_C)和输入电压(u_a, u_b, u_c)之间的传递函数^[19],如式(2)。

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

输出线电压(u_{AB}, u_{BC}, u_{CA})也可以用输入相电压和 S_{ij} 的函数来表示,如式(3)。

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} - S_{21} & S_{12} - S_{22} & S_{13} - S_{23} \\ S_{21} - S_{31} & S_{22} - S_{32} & S_{23} - S_{33} \\ S_{31} - S_{11} & S_{32} - S_{12} & S_{33} - S_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

输入相电流(i_a, i_b, i_c)可以通过式(4)与输出相电流(i_A, i_B, i_C)相关。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

9 个双向开关 S_{ij} 的 27 个开关组合可以表示为电压矢量^[20-21],并在表 1 中作为每个 S_{ij} 状态的函数给出。

2.2 负载电流的离散时间模型

在平衡的三相感性负载中,输出电流(i_A, i_B, i_C)可由式(5)定义,其中 $R_A = R_B = R_C = R$ 为负载电阻, $L_A = L_B = L_C = L$ 为负载电感, u_{BC} 和 u_{CA} 是式(3)中的输出线电压。

$$\begin{cases} \frac{di_A}{dt} = -\frac{R}{L}i_A - \frac{1}{3L}u_{BC} - \frac{2}{3L}u_{CA} \\ \frac{di_B}{dt} = -\frac{R}{L}i_B + \frac{2}{3L}u_{BC} + \frac{1}{3L}u_{CA} \\ i_C = -i_A - i_B \end{cases} \quad (5)$$

一阶差分方程(6)其采样时间为 T_s ,给定 i_A, i_B, i_C 在 k 时刻的值,可以通过此式来预测 i_A, i_B, i_C 在 $k+1$ 时刻的未来值^[22]。

表 1 矩阵变换器开关组合表

Table 1 Switching combinations of MC

分组	开关状态			输出电压		
	$S_{11}S_{12}S_{13}$	$S_{21}S_{22}S_{23}$	$S_{31}S_{32}S_{33}$	u_{AB}	u_{BC}	u_{CA}
1	1 0 0	0 1 0	0 0 1	u_{ab}	u_{bc}	u_{ca}
	1 0 0	0 0 1	0 1 0	$-u_{ca}$	$-u_{bc}$	$-u_{ab}$
	0 1 0	1 0 0	0 0 1	$-u_{ab}$	$-u_{ca}$	$-u_{bc}$
	0 1 0	0 0 1	1 0 0	u_{bc}	u_{ca}	u_{ab}
	0 0 1	1 0 0	0 1 0	u_{ca}	u_{ab}	u_{bc}
2-1	0 0 1	0 1 0	1 0 0	u_{cb}	u_{ba}	u_{ac}
	1 0 0	0 0 1	0 0 1	$-u_{ca}$	0	u_{ca}
	0 1 0	0 0 1	0 0 1	u_{bc}	0	$-u_{bc}$
	0 1 0	1 0 0	1 0 0	$-u_{ab}$	0	u_{ab}
	0 0 1	1 0 0	1 0 0	u_{ca}	0	$-u_{ca}$
2-2	0 0 1	0 1 0	0 1 0	$-u_{bc}$	0	u_{bc}
	1 0 0	0 1 0	0 1 0	u_{ab}	0	$-u_{ab}$
	0 0 1	1 0 0	1 0 0	$-u_{ca}$	u_{ca}	0
	0 1 0	0 0 1	0 1 0	u_{bc}	$-u_{bc}$	0
	0 1 0	1 0 0	0 1 0	$-u_{ab}$	u_{ab}	0
2-3	0 0 1	0 0 1	1 0 0	0	u_{ca}	$-u_{ca}$
	0 0 1	0 0 1	0 1 0	0	$-u_{bc}$	u_{bc}
	1 0 0	1 0 0	0 1 0	0	u_{ab}	$-u_{ab}$
	1 0 0	1 0 0	0 0 1	0	$-u_{ca}$	u_{ca}
	0 1 0	0 1 0	0 0 1	0	u_{bc}	$-u_{bc}$
3	0 1 0	0 1 0	1 0 0	0	$-u_{ab}$	u_{ab}
	1 0 0	1 0 0	1 0 0	0	0	0
	0 1 0	0 1 0	0 1 0	0	0	0
	0 0 1	0 0 1	0 0 1	0	0	0

$$\begin{cases} i_A(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L}\right) i_A(k) - \frac{T_s}{3L} u_{BC}(k) - \frac{2T_s}{3L} u_{CA}(k) \\ i_B(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R}{L}\right) i_B(k) + \frac{2T_s}{3L} u_{BC}(k) + \frac{T_s}{3L} u_{CA}(k) \\ i_C(k+1) = -i_A(k+1) - i_B(k+1) \end{cases} \quad (6)$$

依据等式(4)可以建立 $k+1$ 采样时刻的输入电流 $i_j(k+1)$ 的等式(7)和等式(8)。

$$i_A(k+1) = S_{11}(k+1)i_A(k+1) + S_{21}(k+1)i_B(k+1) + S_{31}(k+1)i_C(k+1) \quad (7)$$

$$i_b(k+1) = S_{12}(k+1)i_A(k+1) + S_{22}(k+1)i_B(k+1) + S_{32}(k+1)i_C(k+1) \quad (8)$$

在 abc 坐标中将 Concordia 变换(9)应用到方程(6)一方程(8)中的预测输入和输出电流模型^[23]。

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在 $\alpha\beta$ 坐标中, 误差 $e_{o\alpha}$ 和 $e_{o\beta}$ 分别为参考电流和输出电流 $i_{o\alpha}$ 和 $i_{o\beta}$ 之间的误差。其等式分别为式(10)和式(11)。

$$e_{o\alpha}(k+1) = i_{o\alpha}^*(k) - i_{o\alpha}(k+1) \quad (10)$$

$$e_{o\beta}(k+1) = i_{o\beta}^*(k) - i_{o\beta}(k+1) \quad (11)$$

如果矩阵变换器的输入功率因数接近于单位 1, 则无功功率参考 Q^* 应当为零。因此, 无功功率误差^[24] e_Q 为

$$e_Q(k+1) = Q^* - (u_{i\alpha}(k+1)i_{i\beta}(k+1) - u_{i\beta}(k+1)i_{i\alpha}(k+1)) \quad (12)$$

将通过上述方法得到的预测输出电流的未来值与保护阈值电流进行实时比较, 当出现输出电流的未来值大于保护阈值电流时, 系统会立即向矩阵变换器的主控制器发出一个过流报警信号。然后, 其主控制器根据过流报警信号执行相应的保护动作, 立即停止给所有的开关器件发送 PWM 脉冲, 这样就及时关断了所有的功率开关器件。接着负载侧的储能通过箝位保护电路与电源侧连接形成回路, 能量会在箝位电路上被释放, 以此来保护开关器件与

负载电动机使其免遭损坏。

3 仿真及实验

3.1 仿真

为了证实所提的基于电流预测的过流保护策略的有效性, 通过在 Matlab/Simulink 中建立所需要的模型对本文所提出的过流保护策略进行仿真。仿真模型如图 2 所示, 并且为了作对比, 在此模型中也对传统的过流保护策略进行了仿真。仿真条件: 输入侧滤波器 $L_f=5$ mH, $C_f=5$ μ F; 负载为阻感负载, 每相 $R=5$ Ω , $L=25$ mH; 开关频率 $f_s=10$ kHz。输入相电压有效值为 120 V, 频率为 50 Hz; 输出相电压有效值为 80 V, 频率为 30 Hz; 输入侧功率因数设为 1。其中双向开关采用理想开关构成。图 3 为两种过流保护策略的仿真波形, 其中图 3(a)为传统过流保护策略下的三相输出电流的波形, 图 3(b)为基于电流预测的过流保护策略下的三相输出电流的波形。

由仿真结果可知, 仿真波形在 0.04 s 后出现过电流, 采用传统的过流保护策略在 0.1 s 时通过采取相应措施关断功率开关器件将过电流降为 0, 本文提出的基于电流预测的过流保护策略在 0.06 s 时就将过电流降为 0 了。由此可见, 基于电流预测的过流保护策略与传统的过流保护策略相比在很大程度上缩短了处理过电流的时间, 进而减少过电流对开关管器件和负载电机的损害, 同时也初步说明了文中所提的过流保护策略的有效性。

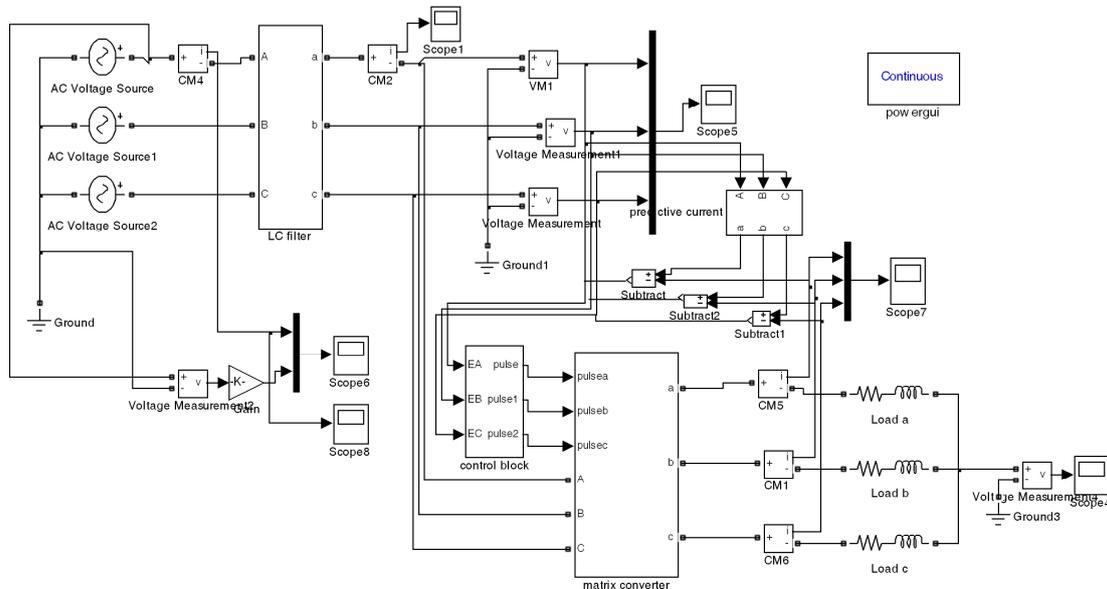
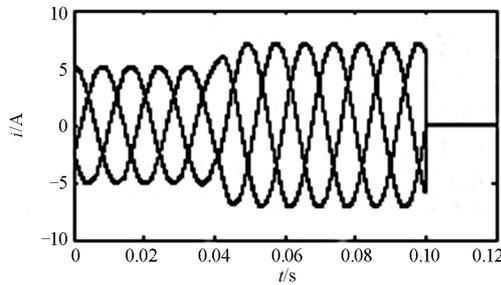
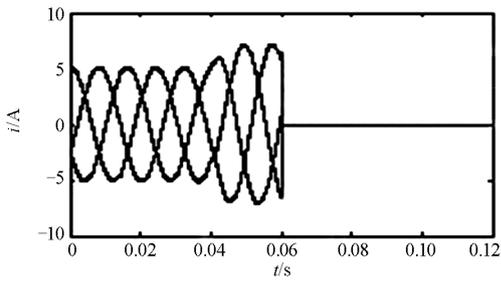


图 2 仿真模型图

Fig. 2 Simulation model



(a) 传统过流保护下三相输出电流仿真波形



(b) 电流预测过流保护下三相输出电流仿真波形

图 3 两种过流保护策略的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveform of three-phase output current under two overcurrent protection strategies

3.2 实验

为了进一步证实文中所提基于电流预测的过流保护策略的有效性和正确性,利用基于 DSP+FPGA 为主要控制器的样机实验设备与一台 1.5 kW 的永磁同步电机来模拟过载故障,电机主要参数为:额定功率 1.5 kW,额定转速 1 500 r/min。其他实验参数:输入相电压有效值为 120 V,频率为 50 Hz;输出相电压有效值为 80 V,频率为 30 Hz;滤波器 $L_f = 1 \text{ mH}$, $C_f = 10 \text{ }\mu\text{F}$ 。实验装置图如图 4 所示,为了进行对比分析,在相同实验参数条件下,对传统过流保护策略与本文介绍的基于电流预测的过流保护策略进行了实验研究。在发生过载故障后,分别采用两种过流保护策略。图 5 为采用两种过流保

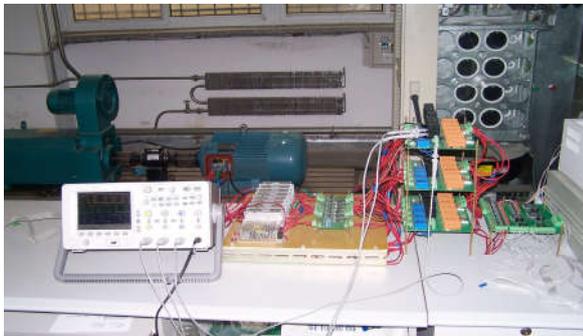
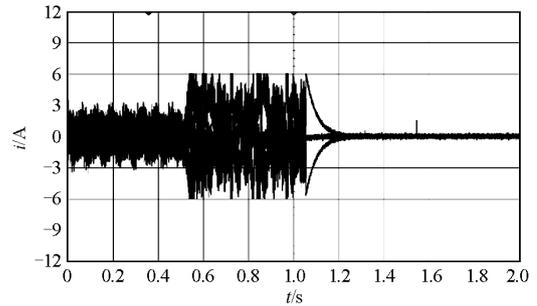
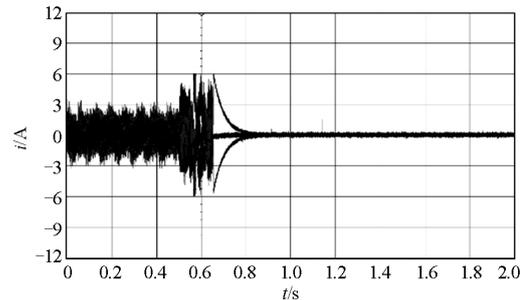


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental device



(a) 传统过流保护下三相输出电流实验波形



(b) 电流预测过流保护下三相输出电流实验波形

图 5 采用两种过流保护策略的实验波形

Fig. 5 Experimental waveform of under two overcurrent protection strategies

护策略的实验波形,其中图 5(a)为传统过流保护策略下的三相输出电流过载前后的波形,图 5(b)为基于电流预测的过流保护策略下的三相输出电流过载前后的波形。从实验波形中可以看到三相电机电流在很短时间内接近于 0。

由实验结果可知,实验波形在 0.5 s 处出现过电流,传统的过流保护策略是在 1.2 s 时将电流降为 0,而基于电流预测的过流保护策略在 0.8 s 时就将电流降为 0 了。由此可以看出,基于电流预测的过流保护策略和传统过流保护策略相比,大大缩短了处理过电流的时间,从而避免了这段时间功率开关器件和负载电机因过电流而出现损坏的情况,进一步说明了文中所提的过流保护策略是可行的。

4 结论

本文提出了一种基于电流预测的矩阵变换器过流保护策略,该过流保护策略通过将预测的输出电流未来值与保护阈值电流进行比较,来判断是否存在过电流,进而再由矩阵变换器的主控制器来控制开关器件的开断,保护负载电动机以及器件免遭损坏。该策略很好地减少了二极管箝位电路保护中检测到过流故障信号传送到控制器这段时间对负载和开关器件造成的损坏。最后通过仿真和实验证实了文中所提过流保护策略的有效性。

参考文献

- [1] WANG L, GAO H, ZOU G. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [2] 邓文浪, 唐亚辉, 李彬艳, 等. TSMC功率开关故障诊断优化[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 7-13.
DENG Wenlang, TANG Yahui, LI Binyan, et al. Optimization of TSMC power-switch fault diagnosis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 7-13.
- [3] 王莉娜, 黄立培. 矩阵式变换器-异步电机系统的故障保护及容错运行方式[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 66-70.
WANG Lina, HUANG Lipei. Fault protection and fault-tolerant operation method for matrix converter-induction motor system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(12): 66-70.
- [4] AUGDAHL B W, HESS H L, JOHNSON B K. Output protection strategies for matrix converters in distributed generation applications[C] // Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, October 8-12, 2006, Tampa, FL, USA: 2082-2089.
- [5] 夏长亮, 阎彦. 矩阵变换器-永磁同步电机系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 1-9.
XIA Changliang, YAN Yan. Matrix converter-permanent magnet synchronous motor drives[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 1-9.
- [6] RAHMAN M H, XU L, YAO L. Protection of large partitioned MTDC networks using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [7] 李勇, 郭勇, 皇甫星星, 等. T型三电平逆变器的中点平衡建模与控制[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 61-65.
LI Yong, GUO Yong, HUANGFU Xingxing, et al. Modeling and control of neutral point voltage balancing for T-Type three-level inverters[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(2): 61-65.
- [8] 李文琢, 房建成, 李海涛. 基于Buck变换器调压的无刷直流电机功率变换器单管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 124-132.
LI Wenzhuo, FANG Jiancheng, LI Haitao. Single switch open-circuit fault diagnosis in brushless DC motor drivers with buck converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 124-132.
- [9] 周宁, 雷响, 荆晓睿, 等. 一种含高渗透率分布式电源配电网自适应过电流保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 24-31.
ZHOU Ning, LEI Xiang, JING Xiaorui, et al. Adaptive over-current protection scheme for distribution network with high penetration rate of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 24-31.
- [10] 韩娜, 周波, 秦显慧, 等. 全双向开关型双级矩阵变换器逆变级容错策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4454-4462.
HAN Na, ZHOU Bo, QIN Xianhui, et al. Fault-tolerant strategy for inverter stage of full bidirectional switches two stage matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4454-4462.
- [11] WANG Lina, XU Fuyuan, SUN Kai, et al. A novel safe shutdown strategy for matrix converter even under fault condition[C] // Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005, March 6-10, 2005, Austin, TX, USA: 1786-1790.
- [12] 马星河, 张少辉, 李自强, 等. 一种用于矩阵变换器的简化非线性自抗扰控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 48-60.
MA Xinghe, ZHANG Shaohui, LI Ziqiang, et al. A simplified nonlinear auto disturbance rejection control strategy for matrix converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 48-60.
- [13] 郭有贵, 黄松涛, 王震, 等. 矩阵变换器直接转矩控制系统的电网故障跨越能力[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 203-211.
GUO Yougui, HUANG Songtao, WANG Zhen, et al. Crossing ability of grid faults for matrix converter direct torque control system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 203-211.
- [14] 王振浩, 刘宇男, 张明江, 等. 基于双向DC/AC变换器的混合储能系统动态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 26-32.
WANG Zhenhao, LIU Yunan, ZHANG Mingjiang, et al. Dynamic control strategy for hybrid energy storage system based on bi-directional DC/AC converters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 26-32.
- [15] 曹言敬, 何凤有, 张旭隆. 一种新颖的矩阵变换器过流保护策略[J]. 电机与控制应用, 2009, 36(3): 43-45.
CAO Yanjing, HE Fengyou, ZHANG Xulong. A new over-current protection strategy for matrix converter[J]. Electric Machines & Control Application, 2009, 36(3): 43-45.
- [16] 陈磊, 季亮, 杨兴武, 等. LCL型并网逆变器新型频率

- 自适应重复控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 57-64.
- CHEN Lei, JI Liang, YANG Xingwu, et al. A new frequency adaptive repetitive control approach for grid-connected inverter with LCL filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 57-64.
- [17] 吴小兰, 谭国俊, 马星河, 等. 基于dSPACE的矩阵变换器电流控制策略实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(13): 3014-3017.
- WU Xiaolan, TAN Guojun, MA Xinghe, et al. Implementation of matrix converter current control strategies based on dSPACE[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(13): 3014-3017.
- [18] MAHLEIN J, BRUCKMANN M, BRAUN M. Passive protection strategy for a drive system with a matrix converter and an induction machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(2): 297-303.
- [19] ANDREU J, DIEGO J M D, ALEGRIA I M D, et al. New protection circuit for high-speed switching and start-up of a practical matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(8): 3100-3114.
- [20] 闫朝阳, 郑倩男, 吴晓雨, 等. 直接变换式三相-单相矩阵变换器的电流型解耦矢量调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊1): 170-178.
- YAN Zhaoyang, ZHENG Qiannan, WU Xiaoyu, et al. Current type de-re-coupling vector modulation strategy of direct transformation three-phase to single-phase matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 170-178.
- [21] 李遥, 许烈, 李永东. 模块化多电平矩阵变换器开关次数最优的拓扑连接策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 342-352.
- LI Yao, XU Lie, LI Yongdong. Topology connecting strategy of the modular multilevel matrix converter for optimal switching times[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 342-352.
- [22] GAMBOA P, PINTO S F, SILVA J F, et al. Predictive optimal control of input and output currents in matrix converters[C] // 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, April 12-14, 2007, Setubal, Portugal: 529-533.
- [23] IRODI A K, SRINIVAS N R. Active overcurrent protection schemes in bridge inverters operating under shoot-through conditions[C] // 2015 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICCC), December 9-11, 2015, Thrissur, India: 1-5.
- [24] TARISCIOTTI L, LEI J, FORMENTINI A, et al. Modulated predictive control for indirect matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 4644-4654.

收稿日期: 2018-04-20; 修回日期: 2018-08-06

作者简介:

马星河(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型变频器研究; E-mail: maxinghe@hpu.edu.cn

王昆朝(1991—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力电子与电气传动。E-mail: wangkunchao1991@163.com

(编辑 周金梅)