

矫正开关函数提高 AC-AC 矩阵变换器的可靠性

赵葵银, 杨青, 唐勇奇

(湖南工程学院, 湖南湘潭 411101)

摘要:提出一种矫正开关函数的容错控制技术,以降低 AC-AC 矩阵变换器断相时的故障发生率,提高变换器的可靠性。通过较详细的数学分析断相故障发生后,用合适的输入电压序列的对称与非对称模式矩阵的构建合成新的开关函数矩阵,进一步合成故障情况下所需的输出波形,使矩阵变换器在缺相时依然能继续运行。仿真与实验结果验证该容错方案的可行性。

关键词:容错算法;开关函数;AC-AC 矩阵变换器;断相故障;可靠性;序列

Abstract: A novel remedial approach of switching function for the fault-tolerant control is presented to reduce open-phase failures occurring in AC-AC matrix converters and to improve the reliability of AC-AC converter. By detailed mathematics analyses, switching function matrices, containing symmetric and anti-symmetric mode matrices with appropriate sequences of input voltages, are developed to synthesize the redefined output waveforms under the faults, so AC-AC matrix converter can continue its operation. The simulation and experimental results show the feasibility of the fault-tolerant scheme.

Key words: fault-tolerant algorithm; switching function; AC-AC matrix converter (MC); open-phase failure; reliability; sequence.

中图分类号:TM762,TP277 文献标识码:A 文章编号:1003-6954(2008)02-0060-02

直接 AC-AC 矩阵变换器 (Matrices Converter, 简称 MC) 是一种高效、节能、可靠、有发展前途的新型电力变换器,它有许多优点,如:不需储能元件,输入和输出电流均为正弦波,输入功率因数高,可实现能量再生,能量可双向流动,具有四象限运行能力,结构紧凑,低噪音,使用寿命长。另外,MC 的诱人之处还体现在经济性方面:相对其它 AC-AC 变换电路而言,它只需数量较少的开关,且过压保护的方法不复杂,费用较低^[1]。MC 的应用领域非常广泛,被寄予厚望的潜在应用领域是在航空航天和军事应用中,这些领域中,减小体积和重量以及在较高温度的环境下可靠运行是一个至关重要问题,甚至超过了装置的费用与复杂性问题^[2]。在这些应用中,当系统故障时必须确保继续运行,因此改善 MC 系统的可靠性尤为重要。为提高系统的可靠性,减少 MC 的故障发生率。在对 MC 开关函数的数学分析的基础上,提出了一种新的 MC 开关函数矫正控制策略与容错算法。

开关函数矩阵由对称与非对称模式两部分组成,当 MC 某一相发生断相故障后,重新改进与矫正三个开关函数矩阵,由矫正后的开关函数矩阵和时变的输

入电压一起,直接重新合成输出波形,确保 MC 继续正常运行。该方法是基于数学分析的矫正方法,方案可靠,且算法简单,易于实现,不需要更改原有系统的硬件。仿真与实验结果验证了所提出的故障容错方案的可行性。

1 矫正开关函数算法

变换器故障主要包括开关开路、变换器的断相、电机绕组开路以及绕组短路等故障。在实际应用中,MC 使用较长时间后,因绝缘老化,断相开路故障发生的几率往往很高,多数情况会导致单相开路。基于中性点的连接方法,分析 MC 的开关函数,提出一种矫正 MC 开关函数的故障容错方案。为得到一个具有容错能力的 MC,提出的故障容错解决方案是两中性点之间增加一连接支路,用 TRN (使用双向晶闸管或反并联的晶闸管) 控制连接。正常情况下,三相对称的输入电压被描述为: $v_{IK} = V_{im} \cos(\omega_t - (k-1)(2\pi/3))$, $k=1, 2, 3$, 其中, V_{im} 为幅值, ω_t 为线路频率;三相平衡输出电压被描述为:

$v_{Oj} = V_{om} \cos(\omega_o t + \theta_o - (j-1)(2\pi/3))$, $j=1, 2, 3$, 其中, V_{om} 为幅值; ω_o 为输出频率; θ_o 为输出电压相角。用开关函数矩阵 $[m_{jk}]_{ABC}$ 来合成期望的输出电

湖南省教育厅资助项目 (05C570)。

压,表达式为:

$$[v_{o1} \ v_{o2} \ v_{o3}]^T = [m_{jk}]_{ABC} [V_{I1} \ V_{I2} \ V_{I3}]^T \quad (1)$$

式中,元素 $m_{jk}(j=1,2,3;k=1,2,3)$ 表示开关 S_{jk} 的调制函数;上标 T 表示转置矩阵。考虑到三相输入端的电压源和变换器输出端的感性负载的对称性,调制函数必须满足关系式^[8]:

$$m_{j1} + m_{j2} + m_{j3} = 1 (j=1,2,3)。$$

当系统检测到开关断路、断相、绕组开路故障时,与故障相有联系的开关矩阵元素不能与被损坏的相建立电气连接。此时,触发 TRN 来连接电源与负载的中性点,使变换器工作在两相控制模式,那么余下两相的输出电压和电流的幅值须被调整为乘以 $\sqrt{3}$ 倍,而相位也须在原来基础上相移 30° 。假定缺相故障发生在 C 相,A、B 相的输出电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为^[3]:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos(\omega_o t + \theta_o - (\pi/6)) - (j-1)(\pi/3), j=1,2 \quad (2)$$

C 相损坏时,由修正的开关函数矩阵 $[m_{jk}^r]_{AB}$ 与三相输入电压重新构造所需的输出电压,定义为:

$$[v_{o1}^r \ v_{o2}^r]^T = [m_{jk}^r]_{AB} [V_{I1} \ V_{I2} \ V_{I3}]^T \quad (3)$$

求取开关函数矩阵 $[m_{jk}^r]_{AB}$ 可按:

$$[m_{jk}^r]_{AB} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(1) & m_s^r(2) & m_s^r(3) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \\ m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) & m_{as}^r(2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, $m_s^r(i) = \cos[(\omega_o + \omega_l)t - (i-1)(2\pi/3)]$, $m_{as}^r(i) = \cos[(\omega_o - \omega_l)t - (i-1)(2\pi/3)]$, $i=1,2,3$, $[J_{23}]$ 是一个 2×3 的单位矩阵,下标 s 与 as 分别表示对称与非对称方式的元素,对称与非对称方式矩阵均含有输入电压矢量的正序与负序分量。

同样地,若缺相故障发生在 A 相,B、C 相的输出电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos[(\omega_o t + \theta_o - (2\pi/3) - (\pi/6)) - (j-2)(\pi/3)], j=2,3 \quad (5)$$

A 相损坏时,求取开关函数矩阵 $[m_{jk}^r]_{BC}$ 按:

$$[m_{jk}^r]_{BC} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(2) & m_s^r(3) & m_s^r(1) \\ m_{as}^r(3) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(2) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

同样地,若缺相故障发生在 B 相,C、A 相的输出

电压按调整和修正后的幅值与相角,重新定义为:

$$v_{oj}^r = \sqrt{3} V_{om} \cos[(\omega_o t + \theta_o - (4\pi/3) - (\pi/6)) - (j-3)(\pi/3)], j=1,3 \quad (7)$$

B 相损坏时,修正的开关函数矩阵 $[m_{jk}^r]_{CA}$ 按:

$$[m_{jk}^r]_{CA} = \frac{1}{3} [J_{23}] + \frac{4V_{om}}{9V_{om}} \begin{bmatrix} m_s^r(1) & m_s^r(2) & m_s^r(3) \\ m_{as}^r(3) & m_{as}^r(1) & m_{as}^r(2) \\ m_{as}^r(2) & m_{as}^r(3) & m_{as}^r(1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过以上分析可知,只要通过适当的元素序列就可以得到缺相时的容错开关矩阵,合成新的输出电压,可使变换器继续运行。MC 的输入电流通过转置开关函数矩阵被求得,由于非对称两相运行,该电流包含的 ω_o 和 $2\omega_o - \omega_l$ 分量的谐波,要注意的是,故障期间的输入电流质量是次要的,因为让变换器故障后继续运行只是一个短期的应急与保护过程。

2 方案验证

通过 Matlab 仿真与实物实验,验证提出提高 MC 可靠性的故障容错方案。仿真与实验参数为:输出频率为 55 Hz,开关频率为 10 kHz,三相平衡 R-L 负载 (5 Ω , 15 mH),电源相电压为 200 V,50 Hz。图 1 为在 C 相缺相故障时,A、B 两相电流与线电压的仿真波形,可以看出,电压幅值约 600 V (理论值为 $200 \text{ V} \times \sqrt{3} \times \sqrt{3} = 600 \text{ V}$),并产生了 30° 的相移,状态过度平稳。以 DSP(TMS320F2407)和 FPGA(EPM7128S)为核心,建立 AC-AC 矩阵变换器的实验装置,测试提出的控制策略,图 2、图 3 分别为 C 相故障情况下稳态和瞬态时的输出电流波形,从实验中可看出,系统过度过程平稳,波形正弦度较好,达到了预期的性能,系统能可靠工作。

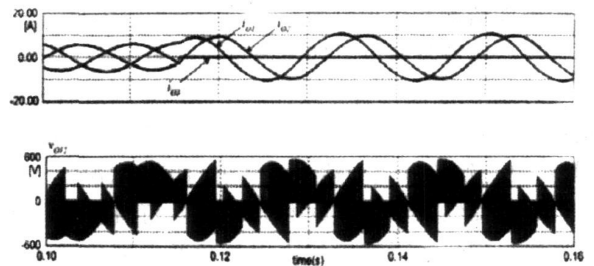


图 1 C 相故障(缺相)情况下的输出电流与输出线电压的仿真结果 (下转第 81 页)

6 结论

中国在今后相当长一段时间内对能源需求量还很大,要实现能源的可持续发展,达到高效、节能、环保的目的,必须探求合理的能源利用方式。

以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统是一种提供清洁、可靠、高质量电能并实现冷热电联供的新技术,作为集中供电大电网的补充,它对环境安全及经济、能源的可持续发展起着战略意义。

分布式供能系统有多种方案,而中国对分布式供能系统的研究起步较晚,但作为集中供能系统的有益补充,分布式供能系统是中国未来能源系统的一种必然趋势。由于设备昂贵,技术有限,对实体组装进行现场研究是不现实的,所以,借助模块化模型的建立,并在此基础上进行仿真分析就成了进一步研究与优化分布式供能系统的有利手段。

前面以模块化模型的形式较为系统地给出了以

微型燃气轮机为核心的几种主要分布式供能系统,在模块化模型的基础上提出相应结合技术或相关优化方法,旨在为分布式供能系统的仿真优化打下良好的基础。

参考文献

- [1] 杨策,刘宏伟,李晓等.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003.
- [2] 黄锦涛,丰镇平,刘莉.微型燃气轮机冷热电联产系统运行模式研究[J].热力发电,2004.
- [3] 冯志兵,金红光.燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J].中国电机工程学报,2006.
- [4] 段立强,徐刚,林汝谋,等.IGCC系统热力与环境性能结合的评价准则[J].中国电机工程学报,2004.
- [5] 翁一虎,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003.
- [6] Omar Othman Badran. Gas turbine performance improvement [J]. Applied Energy, 1999.

(收稿日期:2007-12-22)

(上接第61页)

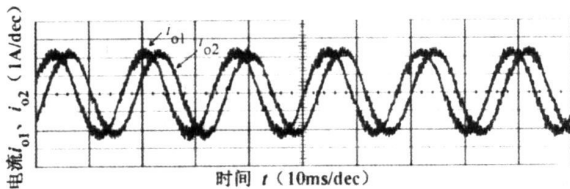


图2 C相缺相故障时输出电流的实验结果(1A/格,10ms/格)

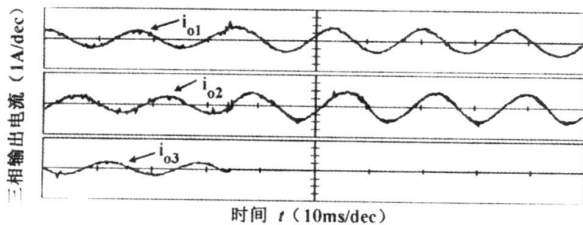


图3 故障发生时的瞬态输出电流波形的实验结果(1A/格,10ms/格)

3 结论

无论哪一相发生故障,均可在数学分析方法的基础上,重新构建的开关函数矩阵,合成新的输出信号,

使MC在缺相情况下仍然可以继续工作,大大减少了因某一相断相时MC停止运行的几率。仿真与实验已经证明该容错方案的可行性,提出的矫正开关函数矩阵策略,可用来提高MC抗故障的鲁棒性。

参考文献

- [1] 王兆安,黄俊.电力电子技术(第4版)[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] O. Simon, J. Mahlein, M. N. Muenzer, and M. Bruckmann, "Modern Solutions for Industrial Matrix Converter Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 2, pp. 401-406, Apr. 2002.
- [3] P. Wheeler, J. Clare, L. Empringham, M. Apap, and M. Bland, "Matrix Converters," Power Engineering Journal, vol. 16, no. 6, pp. 273-282, Dec. 2002.
- [4] T. H. Liu, J. R. Fu, and T. A. Lipo, "A Strategy for Improving Reliability of Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, no. 5, pp. 910-918, Sep./Oct. 1993.
- [5] 汤宁平,王建宽,吴汉光.矩阵变换器的SPWM控制技术及其实现[J].电工技术学报,2003(4):25-29.

作者简介:

赵慕银,男,1968年生,硕士,副教授,研究方向:电力电子与电气传动、过程控制。

(收稿日期:2007-12-10)