

基于 PSIM 和 Matlab 的变频器故障仿真分析

张晓波¹, 王占霞², 张新燕¹, 王维庆¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830008;

2. 北京同方电子科技有限公司珠海分公司, 广东省 珠海市 519080)

Fault Simulation and Analysis of Frequency Converter Based on PSIM and Matlab

ZHANG Xiao-bo¹, WANG Zhan-xia², ZHANG Xin-yan¹, WANG Wei-qing¹

(1. Electrical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 830008, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China;

2. Zhuhai Branch of Beijing Tongfang Electronic Science & Technology Co., Ltd., Zhuhai 519080, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The structure of frequency converter is presented. By use the software PSIM and Matlab the simulation of frequency converter is performed. During the simulation, the graphics are used to contrast and analyze the different roles played by normal faults and inductance filter in the simulation based on PSIM and Matlab. The mechanism causing frequency converter faults and how to reappear them by PSIM and Matlab are presented. Finally, the fault waveforms obtained from the simulation are processed by fast Fourier transform (FFT), and the differences among the faults simulated by different software are compared to explain the characteristics of waveforms of frequency converter faults and the method to judge faulty position by FFT waveform. The content of this research could be available for subsequent implementation of intelligent diagnosis of frequency converter faults.

KEY WORDS: frequency converter; fault diagnosis; PSIM; Matlab; fast Fourier transform (FFT)

摘要: 介绍变频器的结构, 在电力系统仿真软件 PSIM 和 Matlab 软件下对变频器进行仿真。仿真过程中用图形对比分析了滤波器滤波和电感滤波在 2 种不同仿真软件中起到的不同作用。介绍了变频器故障产生的机理以及在软件中如何仿真实现。最后用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)对仿真出的故障波形进行处理。对比了不同软件仿真出的故障间的差异, 说明了变频器故障波形的特点以及由 FFT 转换波形判断故障位置的方法, 以期为后续实现故障智能诊断做好准备。

关键词: 变频器; 故障诊断; PSIM; Matlab; 快速傅里叶变换

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50767003,50867004); 新疆教育厅自然科学基金资助项目(XJEDU2007105)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (50767003,50867004).

0 引言

变频器是由电力电子元件组成的对交流电的频率、电压等参数进行变换的装置, 通常由一次侧主电路进行电力变换, 输出调压、调频电源, 由二次侧控制电路的控制指令进行控制。风力发电中的双馈式和直驱式风力发电机都需要通过变频器接入电网^[1]。变频器在人们生活中的应用越来越广泛。

变频器所处现场往往环境恶劣, 高温发热、油脏污、灰尘以及交变的电磁干扰等都无法估计, 既影响变频器性能也极易导致变频器故障^[2-5]。随着变频器应用的增多, 变频器发生故障后如何进行诊断以及如何确定故障位置越来越引起人们的关注。研究人员对常规的变频器故障进行了大量的研究, 包括环境温度、载波频率、泵升电压、电源电压对变频器的影响^[6-9]。对于单个整流电路的故障诊断, 国内外研究人员也进行了大量的研究, 有的提出了基于参考模型的电力电子电路故障的在线诊断方法, 利用参考模型法进行各种故障的仿真和实验研究。有的将神经网络技术和小波分析用于整流电路研究, 并取得了一定的进展。国内外研究人员对通用电力电子电路的智能诊断方法进行了大量的研究, 使用的方法也多种多样^[10-15]。本文试用 PSIM 和 Matlab 软件^[16-19]对变频器故障进行仿真分析。

1 仿真软件介绍

PSIM 是专门用于分析和设计电力电子电路和电机控制系统的一个计算机仿真包, 具有快速仿真和界面友好的特点。在有效的 PSIM 仿真环境下, 大量的电力变频器电路及其控制技术都能很容易执行并分析。Matlab 软件长于数值计算, 能处理大

量的数据，而且效率比较高。

2 仿真结构

2.1 一次侧仿真结构

典型的交-直-交变频器一次侧电路实际上是由一个三相桥式 AC/DC 整流器和一个三相桥式 DC/AC 逆变器组成的，通过改变整流侧和逆变侧的控制波形来实现对输入波形频率和电压的变换。本

文中一次侧电路由 2 组 6 管的 H 桥整流逆变器组合而成。图 1 是在 PSIM 下搭建的变频器一次侧模型，其中 i_a 、 i_b 、 i_c 分别对应 A、B、C 相的上桥臂驱动电流入口， i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 分别对应 A、B、C 相的下桥臂驱动电流入口。VP4、VP5、VP6 测量的分别是 AB、BC、AC 间的线电压，V10 测量的是 A 相对地电压。图 2 是在 Matlab 中搭建的类似结构的变频器模型。

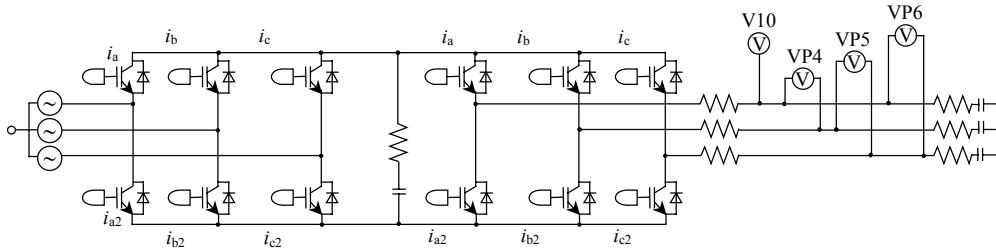


图 1 PSIM 下的主电路模型
Fig. 1 Model of main circuit in PSIM

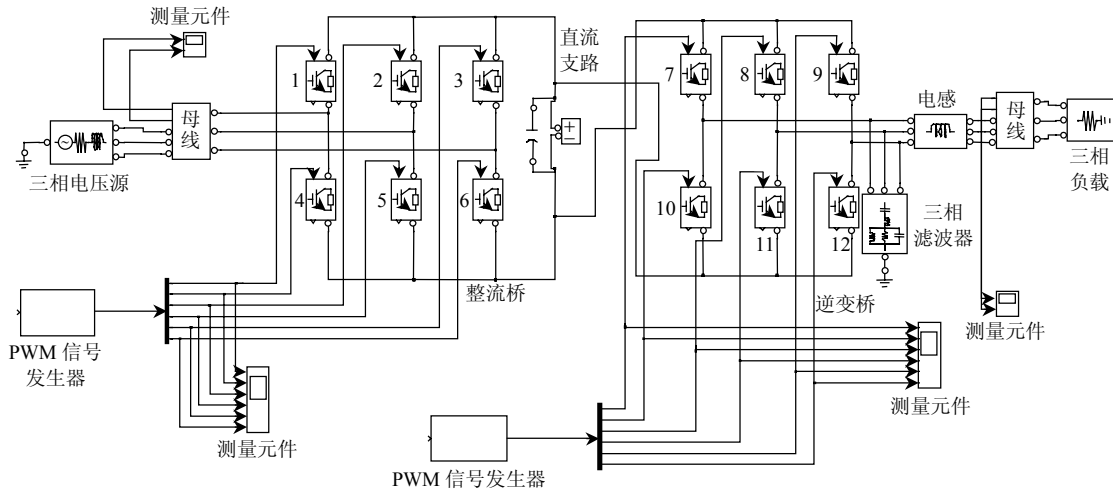


图 2 Matlab 下的电路模型
Fig. 2 Model of circuit in Matlab

2.2 控制波形的产生

本文中变频器开关管的控制波形采用的是正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 控制波形。具体产生方式是将 3 个电压幅值、频率相同，相位各自相差 120° 的正弦工频信号与一个 5 kHz 的三角波载波信号进行比较，然后经过处理形成开关管所用的 PWM 波信号。图 3 给出了在 PSIM 软件下产生 SPWM 控制波形的电路图。其中： i_a 、 i_b 、 i_c 以及 i_{a2} 、 i_{b2} 、 i_{c2} 分别对应图 1 中的桥臂驱动输出电流； U_1 、 U_2 、 U_3 分别为三相 50 Hz 交流输入中的 A、B、C 相发生源； U_c 为 5 kHz 三角波发生源；V1、V11、V9、V13 分别为为对应连接点的电压测量模块。Matlab 下有专门的 PWM 波形产生模块，不用另外搭建，Matlab 中 PWM 控制波形的产生见图 2。

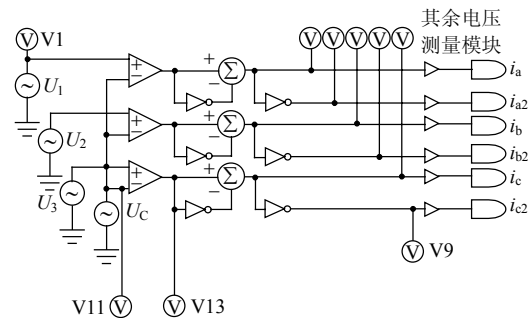


图 3 SPWM 控制电路
Fig. 3 SPWM control circuit

2.3 滤波器接入的波形对比

仅使用 PWM 波形控制 H 桥式变频器是无法直接输出三相正弦波形的，由于 PWM 产生于高频载波与工频信号的叠加，其输出波形中也必然包含高次谐波。因此，在变频器的末端到输出端之前必须加入滤波器环节。在 PSIM 软件下直接用三相电感

滤波就能得到比较理想的三相正弦输出波形,见图4~5;但在Matlab软件下,由于采用算法的不同,必须加入一个专门的对地滤波器模块,再通过电感滤波,才能得到接近满意的输出波形,见图6~9。

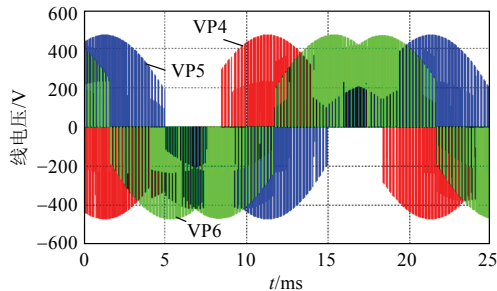


图4 含高次谐波的输出线电压
Fig. 4 Output line voltage including high order harmonic components

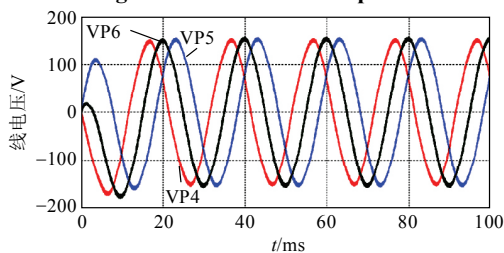


图5 加电感滤波后的输出线电压
Fig. 5 Output line voltage with filter inductance

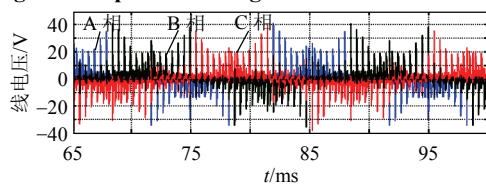


图6 无电感及滤波器时的输出线电压
Fig. 6 Output line voltage without filter or inductance

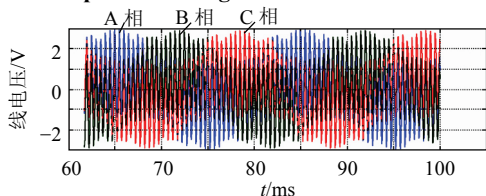


图7 仅用强电感滤波时的输出线电压
Fig. 7 Output line voltage with only high inductance

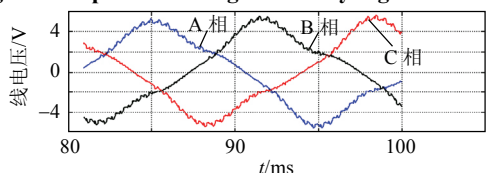


图8 有滤波器和弱电感时的输出线电压
Fig. 8 Output line voltage with both filter and low inductance

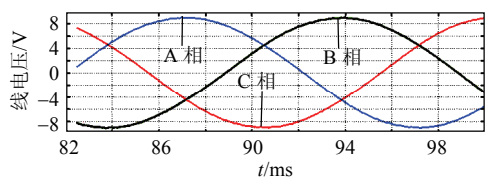


图9 有滤波器及强电感时的输出线电压
Fig. 9 Output line voltage with both filter and high inductance

3 故障的产生

3.1 元件故障产生机理

目前风力发电机中电力电子开关大量使用了绝缘栅双极晶体管 (insulated gateway bipolar transistor, IGBT), 当其两端电压过高或过电流导致温度过高等, 都可能导致开关管超过耐受极限而击穿或烧毁, 有的甚至是永久性损坏^[20]。

导致变频器中开关管过电压和过电流的原因是多方面的, 常见的有变频器本身的质量问题、元件接触不良、型号参数不匹配等, 此外, 风力发电机在运行过程中遭遇电网故障, 功率无法馈送入电网, 导致功率直流侧和输出侧电压升高, 发电机在运行过程中由于负载突变产生过高的冲击电流, 发电机及传输电缆绝缘老化导致匝间或相间短路形成短路电流等, 如最终超过元件的耐受限度, 都会导致变频器元件故障。

3.2 仿真故障产生方法

在软件中, 故障模块无法直接产生故障。在实际故障中, 单只 IGBT 的对外故障总体来说只有开关管击穿和开关管断路 2 种。开关管击穿表现为不受控短路现象, 而开关管断路一般是由开关管发热过大导致的, 其余介于这 2 种极端故障之间的对外表现现象与此类似。因此, 对于单只开关管的 2 种故障, 本文直接以在模型中接导线旁路开关管和将开关管直接切除来仿真其短路故障和开路故障。

4 仿真结果

4.1 PSIM 故障波形对比

本文变频器模型中共有 12 只 IGBT, 每只都对应有短路及断路 2 种故障现象, 组合起来故障种类很多。图 10~14 是用 PSIM 仿真的部分故障波形。图 10 与图 11 是整流侧同一开关管上分别发生短路及开路故障时的仿真波形, 可以看出, 在同一位置发生短路及开路故障时, 所对应的输出电压波形是不同的。图 12 中 2 组波形分别是整流侧另一只开关管上发生短路及开路故障时的输出电压。对比图 10、11 可以看出, 在变频器中不同位置发生同一故障时, 输出电压波形是不同的, 由此可通过记录输出波形来定位故障发生位置。图 13 中的 2 组波形分别代表了同一桥臂的两 IGBT 发生短路及开路故障时的波形, 图 14 中的 2 组波形分别代表了不同桥臂的两 IGBT 发生短路及开路故障时的波形。对比图 13 可以看出, 在同时发生 2 个及以上单 IGBT 故障时, 不同的故障位置组合对应的输出波形也是

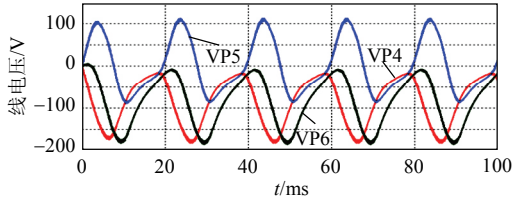


图 10 整流侧单管短路时的输出电压
Fig. 10 Output voltage with single IGBT short circuit at rectifier side

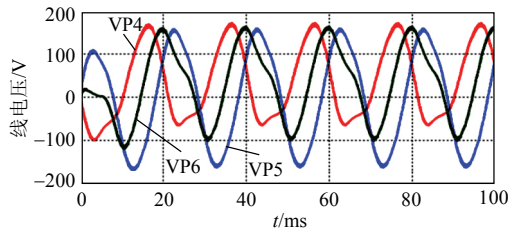
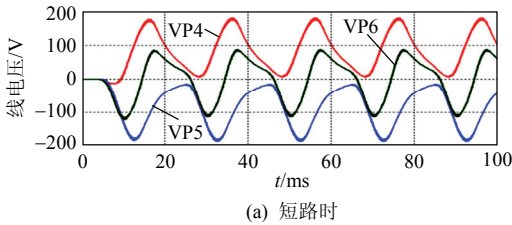
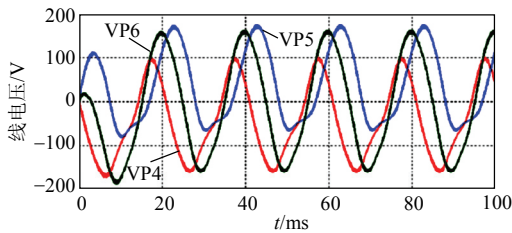


图 11 同一管开路时的输出电压
Fig. 11 Output voltage with the same single IGBT open circuit

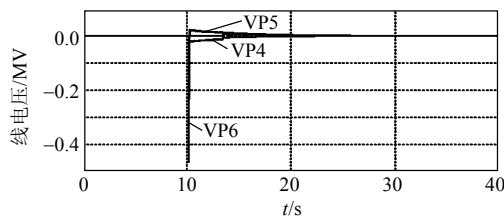


(a) 短路时

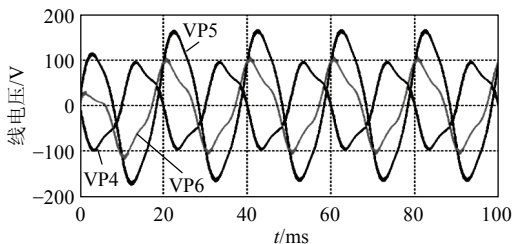


(b) 开路时

图 12 整流侧另一单管短路及开路时的输出电压
Fig. 12 Output voltage with another IGBT short circuit and open circuit at rectifier side

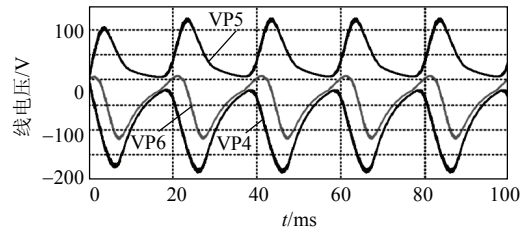


(a) 短路时

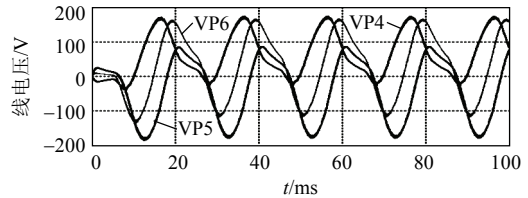


(b) 开路时

图 13 同一桥臂两管短路及开路时的输出电压
Fig. 13 Output voltage with two IGBTs in the same bridge leg short circuit and open circuit



(a) 短路时



(b) 开路时

图 14 不同桥臂两管短路及开路时的输出电压

Fig. 14 Output voltage with two IGBTs in the different bridge legs short circuit and open circuit

不同的，由此认为：通过分析输出波形不但可以分类组合故障类型，还可以分类组合故障位置。

4.2 FFT 分析结果

图 15~19 是在 PSIM 下对输出电压波形进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)得到的图形。由正常运行状态下的变频器 FFT 图(图 15)可以看出，三相波形都比较均衡，且高次谐波很少，绝大部分能量都分布在工频 50 Hz 处，变频效果比较理想。当变频器发生单管短路时(图 16)，三相波形分布不再均衡，在工频分量的整数倍处如 100、150、200Hz 处明显出现了高次谐波，特别是在工频分量的 1 倍频(100Hz)处，BC 线电压的分量 VP5 明显大于其他两相分支，而基波分量也出现了明显的衰减，从 150 降到了 82 左右，呈现出故障态。图 17 是同一管开路的 FFT 图，从中不难发现三相波形也是明显不平衡，但基波分量的衰减却没有短路时严重，大部分仍能达到 120 左右，而且 100Hz 和 150Hz 处的分量也明显与短路时不同。图 18、19 分别是不同单管发生短路时的电压 FFT 和发生不同桥臂短路组合时的电压 FFT，对比图 16 可以看出，在不同故障以及同一故障的不同位置，对应 FFT 波形的形状、分布和大小都是不同的。由此可知，根据输出电压的 FFT 变换波形也可以判断变频器故障

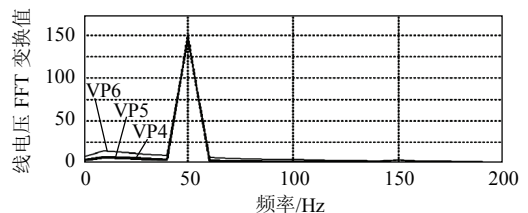


图 15 正常情况下的输出电压 FFT 分析

Fig. 15 Output voltage FFT analysis in normal situation

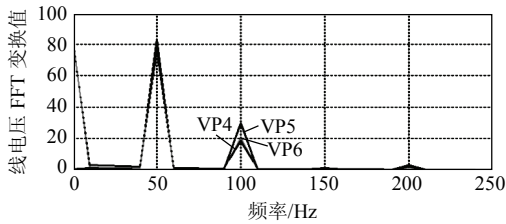


图 16 单管短路下的输出电压 FFT 分析
Fig. 16 Output voltage FFT analysis with single IGBT short circuit

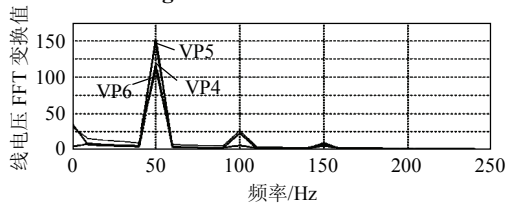


图 17 同一管开路下的输出电压 FFT 分析
Fig. 17 Output voltage FFT analysis with the same IGBT open circuit

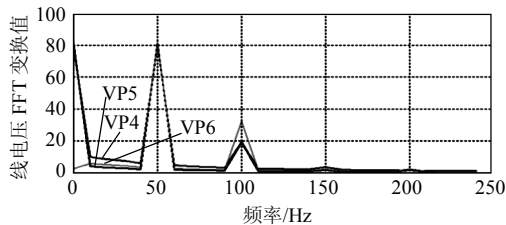


图 18 另一桥臂单管短路下的输出电压 FFT 分析
Fig. 18 Output voltage FFT analysis with IGBT in the other bridge leg short circuit

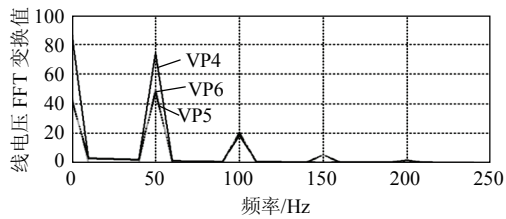


图 19 故障组合时的输出电压 FFT 分析
Fig. 19 Output voltage FFT analysis with more faults combination

的类型和发生位置。

4.3 Matlab 仿真结果对比

用 Matlab 也可以进行故障波形的生成和判断分析。图 9 给出了正常状态时的输出电压波形，图 20~22 分别是在 Matlab 软件下实现的单管短路、单管开路、混合桥臂短路故障的输出电压波形，其他故障类型波形还有很多，限于篇幅，不再一一罗列。

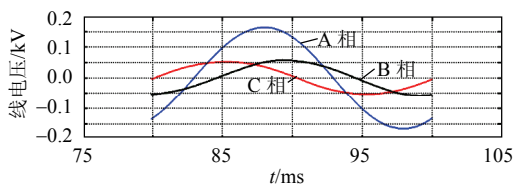


图 20 单管短路输出电压
Fig. 20 Output voltage with single IGBT short circuit

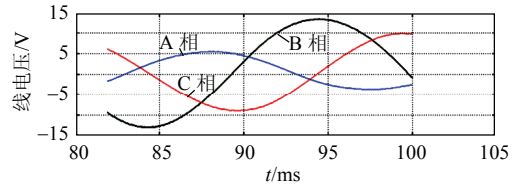


图 21 单管开路输出电压
Fig. 21 Output voltage with single IGBT open circuit

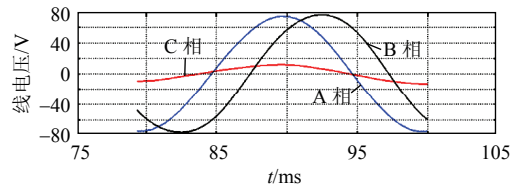


图 22 混合短路输出电压
Fig. 22 Output voltage with more faults combination

4.4 差异分析

从 4.2、4.3 节的故障仿真对比可以看出，PSIM 软件中的模型比较小巧，易于稳定，所以绘制出的故障波形比较丰富，特征也比较明显。而 Matlab 软件由于算法比较复杂，建模阶段为了使模型输出稳定而加入了滤波器和较大的电感，这样做带来的副作用就是由于以上 2 元件的强滤波作用，输出电压波形始终比较平滑，高次谐波较少，可能与真实波形差距较大，但仍然可以从输出波形的各相幅值大小、相位等信息来判断故障的类型和位置。

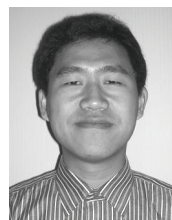
5 结论

本文在 PSIM 和 Matlab 2 个不同平台上对变频器故障进行仿真对比，并通过 FFT 波形分析的方法研究了如何根据变频器输出电压波形来判断变频器故障及其类型和位置。通过对比 2 种软件的仿真结果可以看出，PSIM 软件比较小巧，算法简单，运行速度快，耗用资源较少，模型稳定且波形比较丰富，故障特征比较明显。而 Matlab 软件本身较庞大，算法比较复杂，耗用计算机资源较多，在内存不足的情况下，程序运算过程中经常死机，运行较慢，模型不容易稳定，但其后续波形分析能力较强，除了 PSIM 中提供的 FFT 分析外，还能进行小波分析，同时还能提供神经网络^[21-22]、遗传算法、模糊理论等智能分析识别工具。如何将 2 种软件的优点结合起来，取长补短，实现变频器的故障智能识别，是后续研究的重点。

参考文献

[1] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.
Cao Na, Zhao Haixiang, Dai Huizhu. Analysis on reactive power and

- voltage of commonly used wind turbines interconnected to power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94(in Chinese).
- [2] Khomfoi S, Tolbert L M. Fault diagnosis and reconfiguration for multilevel inverter drive using AI-based techniques[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 2954-2968.
- [3] 郑康, 潘再平. 变速恒频风力发电系统中的风力机模拟[J]. 机电工程, 2003, 20(6): 40-42.
Zheng Kang, Pan Zaiping. The imitation of the fan characteristic in variable-speed constant-frequency wind-power generation system [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2003, 20(6): 40-42(in Chinese).
- [4] 肖文勋, 张波. DC-DC 变换器的最小投影法切换律[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 1-6.
Xiao Wenxun, Zhang Bo. Switching rule based on min-projection strategy of DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 1-6(in Chinese).
- [5] 陈道炼, 尹春. 高频交流环节 AC-AC 变频变换系统基准正弦电路研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 5-8.
Chen Daolian, Yin Chun. Research on a reference sinusoidal circuit of the AC/AC variable frequency conversion system with high frequency AC link[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 5-8(in Chinese).
- [6] 苑国锋, 柴建云, 李永东. 变速恒频风力发电机组励磁变频器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 90-94.
Yuan Guofeng, Chai Jianyun, Li Yongdong. Study on excitation converter of variable speed constant frequency wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 90-94(in Chinese).
- [7] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [8] 吴小华, 史忠科. 基于 DSP 三相逆变电路在线故障诊断研究设计[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 37-39.
Wu Xiaohua, Shi Zhongke. On-line fault diagnosis research and design for 3-phase inverter based on DSP[J]. Power Electronics, 2004, 38(2): 37-39(in Chinese).
- [9] 张志学, 马皓, 毛兴云. 基于混杂系统模型和事件辨识的电力电子电路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 49-53.
Zhang Zhixue, Ma Hao, Mao Xingyun. Fault diagnosis for power electronic circuit identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 49-53(in Chinese).
- [10] Hosseini S H, Babaei E. A new generalized direct matrix converter [C]. International Symposium on Industrial Electronics, Pusan, Korea, 2001.
- [11] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变换器 PWM 控制方法的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46.
Wu Hongyang, He Xiangning. Research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46(in Chinese).
- [12] Lai Jisheng, Peng Fangzheng. Multilevel converter: a new breed of power converter[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(3): 509-517.
- [13] Tolbert L M, Peng F Z, Habetler T G. Multilevel PWM methods at low modulation indices[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(4): 719-725.
- [14] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 40-96.
- [15] 王守相, 江兴月, 王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2006, 30(21): 42-45.
Wang Shouxiang, Jiang Xingyue, Wang Chengshan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators [J]. Power System Technology, 2006, 30(21): 42-45(in Chinese).
- [16] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB7 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 15-67.
- [17] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLABR2007 实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 30-107.
- [18] 王蕊, 刘肇旭, 宋新立, 等. 基于 Matlab 的大型火电机组一次调频特性仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 42-46.
Wang Rui, Liu Zhaoxu, Song Xinli, et al. Matlab-based simulations of primary frequency control for large thermal generating unit [J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 42-46(in Chinese).
- [19] 谢小荣, 严干贵, 陈远华. 三电平 PWM 变频调速控制系统的 MATLAB 仿真平台[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 18-22.
Xie Xiaorong, Yan Gangui, Chen Yuanhua. MATLAB simulation platform for three-level PWM variable-frequency speed-governing control system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 18-22(in Chinese).
- [20] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 29-31.
- [21] 张晓波, 张新燕, 王维庆. 用神经网络对风力发电中电力电子故障分析[J]. 华东电力, 2008, 36(7): 16-18.
Zhang Xiaobo, Zhang Xinyan, Wang Weiqing. Fault analysis of the power electronic equipment in the wind power system with the neural networks[J]. East China Electric Power, 2008, 36(7): 16-18(in Chinese).
- [22] 张晓波, 张新燕, 王维庆. 用小波分析来判定风力发电中电力电子的故障[J]. 电机技术, 2008(5): 47-50.
Zhang Xiaobo, Zhang Xinyan, Wang Weiqing. Fault analysis of the power electronic equipment in the wind power system with the wavelet analysis[J]. Electrical Machinery Technology, 2008(5): 47-50(in Chinese).



张晓波

收稿日期: 2009-10-20.

作者简介:

张晓波(1983—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为风力发电与并网技术, E-mail: dna19831983@163.com;

王占霞(1978—), 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统仿真;

张新燕(1964—), 女, 博士研究生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为风力机控制、电气系统优化设计;

王维庆(1959—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 研究方向为集散控制系统与风能、太阳能控制技术。

(责任编辑 沈杰)