

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200739

基于瞬时频率的电压源变流器开路故障检测方法研究

雷兴¹, 郭睿², 纪坤华³, 李豪⁴, 周诚²

(1. 华东电力试验研究院有限公司, 上海 200437; 2. 国网上海市电力公司浦东供电公司, 上海 200120;
3. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 4. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对电压源变流器中功率器件的开路故障问题, 通过分析变流器三相电流的固有模态分量特征, 提出了一种基于瞬时频率的变流器开路故障检测方法。首先采用经验模态分解理论获取三相交流电流中的开关模态分量。然后通过希尔伯特变换得到开关模态分量的瞬时频率, 利用开路故障前后开关模态分量瞬时频率特征变化对功率器件的开路故障进行检测。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建柔性直流互联系统仿真模型进行了验证。仿真结果表明, 利用开关模态分量瞬时频率特征能够在几个开关周期内快速地检测出单个或多个故障功率管, 而且在功率调整和潮流反转时具有较好的动态检测性能。

关键词: 功率器件; 开路检测; 开关模态分量; 瞬时频率

Open-circuit fault detection method for a voltage source converter based on instantaneous frequency characteristics

LEI Xing¹, GUO Rui², JI Kunhua³, LI Hao⁴, ZHOU Cheng²

(1. East China Electric Power Test and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200437, China; 2. Pudong Electric Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200120, China;
3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 4. College of Electrical Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Given the problem of an Open-Circuit (OC) fault of power devices in Voltage Source Converters (VSC), a novel OC fault detection method for VSC using instantaneous frequency characteristics is proposed. First, the modal components contained in the three-phase AC current of the VSC are analyzed, and the Empirical Mode Decomposition (EMD) method is used to extract the switching modal components in the three-phase current. Secondly, the instantaneous frequency of the switching modal component is obtained through Hilbert transform so as to detect the OC fault of the power device by the change of the instantaneous frequency characteristics of the switching modal component before and after the OC fault. Finally, the simulation model of a three-terminal VSC interconnection system is built in PSCAD/EMTDC to verify the proposed method. The simulation results show that the proposed method can quickly detect the single or multiple OC fault of a power module in VSC within several switching periods. The method has robust detection performance during power adjustment and power flow reversal.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5442SH190006) "Research on Typical Design and Operation Service of Urban Smart Energy System" and the Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company (No. 5209211900M6).

Key words: power devices; open-circuit fault detection; switching modal components; instantaneous frequency

0 引言

交直流混合配电网兼具交流和直流配电网的特

点和优势, 能够满足大规模的新能源接入和负荷结构的多样化, 在降低损耗、保证电能质量以及提高配电网可靠性等方面具有显著优势, 是未来配电网的发展趋势^[1-2]。柔性直流互联技术以全控型电力电子功率器件为基础, 可实现多个交流供电网络的柔性互联, 其在交直流混合配电网中有着极为广泛的应用前景^[3-4]。电压源变流器(VSC)作为交直流变换

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(5442SH190006)
“城市智慧能源体系典型设计与运行服务研究”; 国网上海市电力公司科技项目资助(5209211900M6)

的核心环节, 及时有效地检测出变流器功率器件开路故障对系统安全运行有着重要的实际价值^[5-6]。

变流器功率器件开路检测方法主要分为基于解析模型、基于知识和基于信号三类^[7]。其中, 解析模型法, 如状态估计法、等价空间法^[8-9]等, 严重依赖于系统模型和参数估计的精确度。基于知识的检测方法可以降低对系统参数的敏感性, 但其计算量较大, 且检测速度较慢^[10-11]。基于信号的检测方法又分为电压检测法和电流检测法。典型电压检测法包含下管电压检测法^[12]、误差电压法^[13]和开关函数模型法^[14]等, 其特点是检测速度快, 但是需要配置额外的电压传感器, 这会增加成本和带来新的不可靠因素。电流检测法通过变流系统自身的电流传感器进行检测, 无需增加额外的硬件设备, 能够实现非侵入式在线检测。

文献[15]提出了一种基于直流分量的开路故障检测方法, 该方法计算简单, 但易受系统噪声和负载影响。文献[16]向集射极注入短时高压脉冲激励, 分析脉冲下 IGBT 等效二端口网络的输出响应, 可以在 $1 \mu\text{s}$ 内快速检测 IGBT 运行状态, 但是存在影响变流器正常运行的可能性。文献[17-18]通过傅里叶变换提取基波幅值对直流分量进行归一化, 以克服对负载的敏感性。本质上, 以上方法均是基波尺度下的幅值检测方法, 其检测周期至少为一个基波周期。而且由于变流器具有快速响应能力, 基波电流幅值存在较大动态变化范围, 电流发生瞬变时可能会干扰检测结果。文献[19]以直流电流的各次谐波分量、交流电流有效值和标么化直流量作为诊断特征量检测换流器开路。文献[20]利用小波变化具有良好的时频局部化能力, 通过提取电流信号的时频局部特征进行故障检测, 但不同的小波基函数对分析结果影响较大, 且其时频分辨率受 Heisenberg 不等式的限制。

本文提出一种基于瞬时频率的变流器开路故障检测方法, 将基于基波幅值检测转化为基于开关模态分量瞬时频率监测。通过经验模态分解对变流器运行电流进行自适应分解, 提取开关模态分量的瞬时频率对功率器件开路故障进行快速检测。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中对所提出的瞬时频率开路法进行了验证。

1 开路故障对变流器电流时频特性的影响

图 1 为典型的电压源变流器拓扑结构图, 其中 T_x 和 D_x 为变流器中 IGBT 开关管及其反并联二极管, $x=1, 2, 3, 4, 5, 6$; U_v 和 I_v 分别为三相电压和三相电流, $v=a, b, c$; n 为变流器的中性点,

U_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流侧电压和直流侧电流; R 和 L 为单相线路的等效电阻和等效电感; C 为直流侧电容。

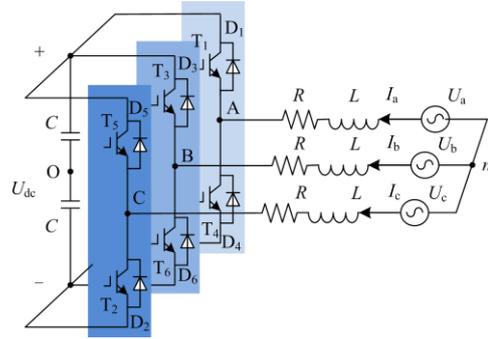


图 1 电压源变流器的拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of a voltage source converter

为便于描述功率管的开关状态, 定义 S_a 、 S_b 和 S_c 分别为 A、B、C 三相的开关函数。根据 PWM 的调制原理, 其开关函数表述如式(1)所示。

$$S_v = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ 0 & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

根据基尔霍夫电压定律, 得到变流器 A、B、C 三相回路的电压方程为

$$\begin{cases} U_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + (S_a U_{dc} + U_{n0}) \\ U_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + (S_b U_{dc} + U_{n0}) \\ U_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + (S_c U_{dc} + U_{n0}) \end{cases} \quad (2)$$

变流器在运行中包含开关模态信息, 功率器件开路会使 $S_v U_{dc}$ 改变, 结合式(2)可知, $S_v U_{dc}$ 改变可导致电流开关模态分量产生变化, 使得三相电流 I_v 发生畸变。以变流器 A 相 T_1 开关管发生开路故障为例, 分析变流器的故障工作过程以及电流响应特性, 其工作模式如下。图 1 中 I_a 的标注方向为线电流的参考方向。

1) 工作模式 1: 若 $I_a > 0$, I_a 由 T_4 与 D_1 实现通流。当 $S_a = 0$ 时, I_a 通过 T_4 流入直流网络; 当 $S_a = 1$ 时, I_a 通过 D_1 续流。在 $I_a > 0$ 的半个周波内, T_1 不参与电路实际工作过程, 其开路故障不影响电路运行状态, 如图 2(a)所示。

2) 工作模式 2: 若 $I_a < 0$, I_a 由 T_1 与 D_4 实现通流。当 $S_a = 1$ 时, I_a 通过 T_1 流出直流网络; 当 $S_a = 0$ 时, I_a 通过 D_4 续流。若 T_1 开关管发生开路故障, 将会使得 I_a 的流动受到限制, 如图 2(b)所示。电流波形在一个周波内只存在于正半周($I_a > 0$), 而在 $I_a < 0$ 的负半周电流值约为 0。

综上分析, 电压源变流器在正常运行时, 理想

状态下三相电流波形经过 PWM 开关调制趋于正弦化;而在电压源变流器中功率器件发生开路故障时,三相电流波形发生畸变。从 PWM 开关信号的角度来看,相当于功率器件丢失开关信号,从而导致故障相电流中固有的开关模态分量发生改变。通过对三相电流信号进行时频分析,提取开关模态分量的故障特征,可用于变流器的开路故障检测。

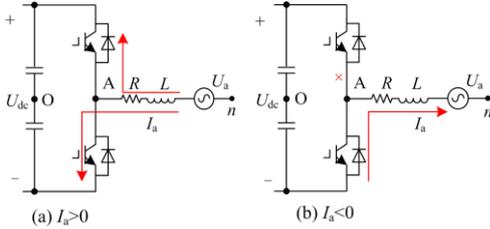


图2 变流器中 T₁ 开路时 A 相电流工作过程

Fig. 2 Operating process of A phase current when T₁ open-circuit is occurred in the converter

2 瞬时频率时频特征提取方法原理

2.1 瞬时频率

假设 $x(t)$ 为一个连续的时域信号,利用 Hilbert 变换得^[21]

$$y(t) = H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

由式(3)可知,Hilbert 变换相当于 $x(t)$ 和 $1/t$ 的卷积,着重强调了时域信号 $x(t)$ 的局部特征,而式(4)所示的极坐标表达式能够更好地展示出其信号的局部特征。将 $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别作为一个复共轭对的实部和虚部,即可以得到解析函数 $z(t)$,如式(4)所示。

$$z(t) = a(t)e^{j\theta(t)} = x(t) + jy(t) \quad (4)$$

其中:

$$a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \quad (5)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (6)$$

式中, $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为解析函数 $z(t)$ 的瞬时幅值和相位角。定义瞬时频率,如式(7)所示。

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (7)$$

2.2 本征模态函数

瞬时频率有意义必须满足以下必要条件:函数具有对称性并且其局部均值为零;函数过零点和极值点的数目保持相等。由于多数信号在任意时间内信号中可能含有数个振荡模式,不符合上述条件,Hilbert 变换无法描述其信号频率,因此需将原始信号分解为本征模态函数。

一个本征模态函数(IMF)必须满足以下两个

条件^[22]。

1) 在函数的整个时间长度中,过零点和极值点的数目必须相等,或者两者相差不超过一个。

2) 在函数任意时间点,局部极大值的包络和局部极小值的包络两者平均值必须等于零。

2.3 EMD 分解原理

EMD 分解能够将信号分解成若干个 IMF 分量和残余分量,具体包括步骤如下,其流程图如图 3 所示。

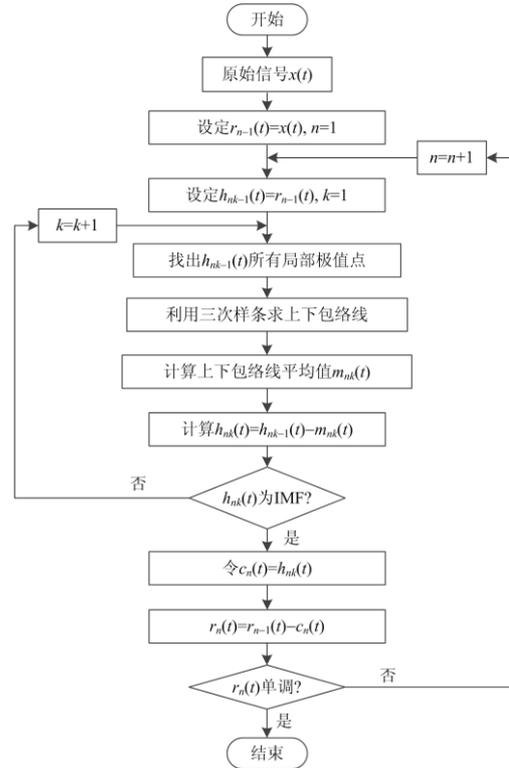


图3 EMD 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the EMD algorithm

1) 对于原始信号 $x(t)$, 首先找出它的所有极大值点和极小值点。

2) 利用三次样条函数分别对得到的极大值点和极小值点进行三次样条插值拟合,可以得到上包络线 $x_{\max}(t)$ 和下包络线 $x_{\min}(t)$, 且满足如式(8)关系。

$$x_{\min}(t) \leq x(t) \leq x_{\max}(t) \quad (8)$$

3) 计算 $x_{\max}(t)$ 和 $x_{\min}(t)$ 的平均值。

$$m_{11}(t) = \frac{x_{\min}(t) + x_{\max}(t)}{2} \quad (9)$$

4) 令原始信号 $x(t)$ 减去平均值 $m_{11}(t)$, 得到一个新序列 $h_{11}(t)$ 。

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (10)$$

5) 检验新序列 $h_{11}(t)$ 是否符合 IMF 分量的定义条件。如果符合条件,则 $h_{11}(t)$ 为 $x(t)$ 的第一个 IMF

分量, 得 $c_1(t)=h_{11}(t)$; 反之, 将新序列 $h_{11}(t)$ 视为原始信号, 重新对其进行步骤(1)一步骤(4), 直至得到的新序列满足 IMF 分量的条件, 即为

$$h_k(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t) \quad (11)$$

式中, $m_{1k}(t)$ 表示上下包络线的平均值。由于 $h_{1k}(t)$ 为满足条件的 IMF 分量, 那么可得

$$c_1(t) = h_{1k}(t) = x(t) - \sum_{i=1}^k m_{1i}(t) \quad (12)$$

记 $h_{1k}(t)$ 为筛选原始信号 $x(t)$ 得到的第一个 IMF 分量, 即为

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t) \quad (13)$$

6) 将 $r_1(t)$ 视为原始信号 $x(t)$, 重复步骤 1)一步骤 5), 即能够得到本征模态函数 $c_2(t), c_3(t), \dots, c_n(t)$, 即为

$$c_n(t) = r_{n-1}(t) - r_n(t) \quad (14)$$

最终, 原始信号 $x(t)$ 的 EMD 分解可表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (15)$$

2.4 频率阈值的选取

变流器开关频率 (f_{sw}) 一般保持不变, 开关模态分量瞬时频率在正常运行时将保持在开关频率附近。当功率器件发生开路故障时, 开关模态分量频率特征会发生变化, 可通过合理选择瞬时频率阈值 (kf_{sw}) 检测出开路故障。若频率阈值选取较小有可能触发误动作。频率阈值选取过大则可能降低灵敏性。由于开关模态瞬时频率特征变化为开关时间尺度, 可以连续检测多个开关周期的频率特征计算平均频率偏差, 通过增加检测时间提高开路故障检测的稳定性, 避免出现误动作。

3 仿真验证

在 PSCAD/EMSEED 电磁暂态仿真软件中建立并联式三端柔性直流输电系统仿真模型。系统连接图与控制框图如图 4 所示, 主要包括 3 个电压源型变流器(VSC), 其中 VSC 1 与交流网络 1 相连, 采用定直流电压控制方式以稳定系统直流电压, 额定直流电压为 100 kV; VSC 2 向无源网络 2 供电, 采用定交流电压/频率控制方式(V/f); VSC 3 与交流网络 3 相连, 采用定有功功率和定无功功率的控制方式(P/Q); 本文主要以变流器 VSC3 为例验证所提出的瞬时频率开路故障检测方法。仿真中 VSC3 的开关频率为 4 kHz。VSC 3 采用 LC 滤波器, 滤波电感为 0.1 H, 滤波电容为 5 μ F; 直流电容为 150 F; 功率器件为理想 IGBT 开关模型; 如图 4 所示, VSC 3 采用功率外环、电流内环的双闭环控制策略以实现

有功功率和无功功率解耦控制。PI 控制器参数为 $K_p=0.6, K_i=0.02$ 。

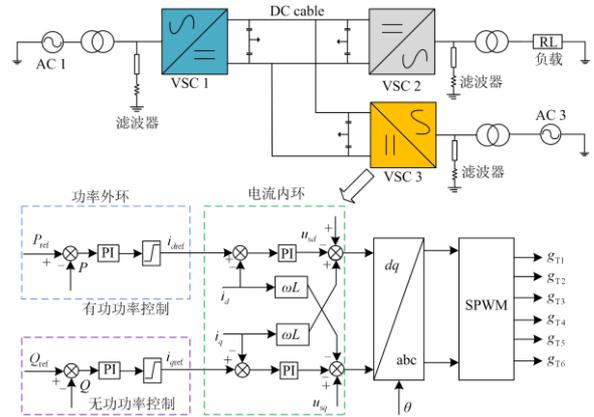


图 4 三端直流输电系统与变流器控制框图

Fig. 4 Three terminal DC transmission system and block diagram of the VSC

3.1 VSC 交流电流信号预处理

电力电子变流器一般采用 PWM 调制策略, 其在正常工作时, 三相交流电流中除包含基波模态分量, 还含有固有的开关模态分量以及少量的高频谐波模态分量。由于 EMD 方法具有自适应性的特点, 对非线性、非平稳信号的处理具有优越性^[23]。本文采用 EMD 分解方法对三相电流信号进行预处理, 图 5 给出了变流器(VSC 3)在 30 MW 的 A 相电流信号模态分解图。

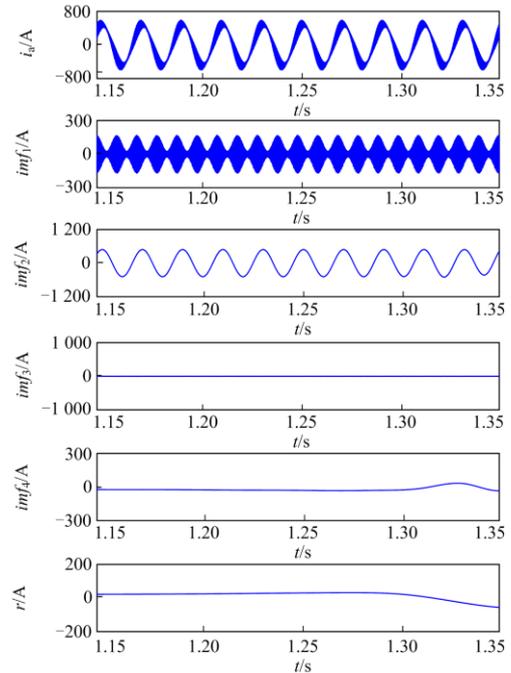


图 5 变流器正常工作时 A 相电流的本征模态分量
Fig. 5 Intrinsic mode components of A-phase current during normal operation of the VSC

如图 5 所示, 根据 EMD 分解理论, 可将变流器运行电流分解成 4 个本征模态函数 imf 和 1 个残余分量 r , 从 imf_1 至 imf_4 的频率呈逐渐递减, 且分量频率越高信息含量越多。任意一个 IMF 分量均对应着 A 相电流信号中所包含的不同频率分量, 共同反应 A 相电流信号中的频率信息特征。

为进一步分析 A 相电流信号的时频信息, 图 6 和图 7 分别给出了 VSC 3 运行在 30 MW 时 A 相电流的边际谱图以及各模态分量的瞬时频率。图 6 表明, A 相电流的频率信息主要分布在基频 50 Hz 和开关频率 4 kHz 附近, 并包含有少量低频分量。

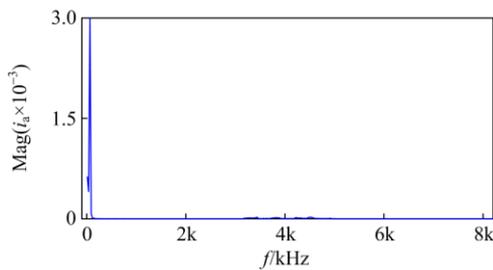


图 6 变流器 A 相电流的边际谱

Fig. 6 Marginal spectrum of A phase current in the converter

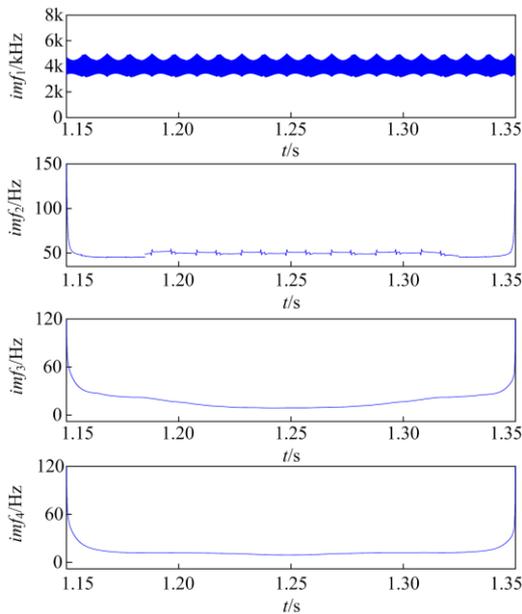


图 7 变流器各 IMF 电流分量的瞬时频率

Fig. 7 Instantaneous frequencies of IMF components in VSC

图 6 表明, imf_1 分量的频率主要分布在 4 kHz 附近, imf_2 分量的频率主要体现换流器的基波频率, imf_3 和 imf_4 分量分别为电流中的低频振荡分量和直流量。 imf_1 分量为变流器电流信号中开关模态分量的本质体现。

由前文分析, 变流器某相中发生功率器件开路故障时, 会导致该相电流信号中包含的固有开关模态分量发生改变。由图 7 可知, 三相电流信号的开关模态分量主要分布在 imf_1 分量中, 因此, 可以利用 imf_1 分量瞬时频率的特征变化对变流器功率器件进行开路故障。

3.2 单个功率管开路故障检测仿真验证

首先对变流器单个功率器件发生开路故障进行检测。采用封锁功率器件触发脉冲的方式模拟开路故障。图 8 给出了 VSC 3 工作在 30 MW 时, 功率管 T_1 发生开路故障前后的三相电流波形, 以及利用 imf_1 模态分量瞬时频率进行开路检测的结果。 T_1 开路故障发生时刻为 1.2 s。为了更清楚地呈现变流器功率器件发生开路故障后的电流畸变, 图 8 中对三相电流波形进行了滑动滤波处理。如图 8 所示, A 相电流在 1.2 s 前 imf_1 的瞬时频率稳定在 4 kHz, 与变流器开关频率相一致。在 1.2 s 时, 变流器 A 相电流位于负半周 ($I_a < 0$), T_1 开路导致 A 相电流立刻发生畸变。A 相电流的 imf_1 分量瞬时频率在 1.2 s 时发生突变, 经 0.5 ms (2 个开关周期) 从 4 kHz 突变到峰值 15 kHz, 而后经 1.5 ms (6 个开关周期) 稳定在 8 kHz 左右。B、C 两相电流开关模态分量的瞬时频率在 T_1 开路故障后无明显变化, 可以初步判断变流器 A 相发生开路故障。根据前文理论分析, T_1 开路故障主要影响 I_a 负半周波, 而 I_a 正半周波主要是通过 T_4 和 D_1 通流。如图 8 所示, A 相电流 imf_1 分量

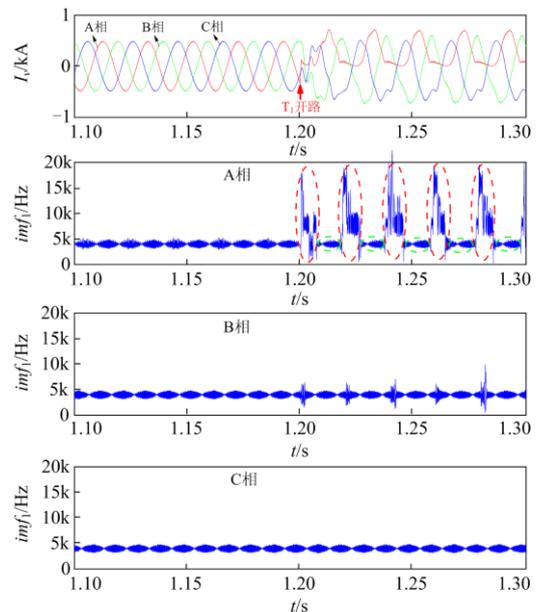


图 8 VSC 3 中 T_1 开路故障的瞬时频率法检测结果
Fig. 8 Detection result of T_1 open circuit fault in VSC 3 by the instantaneous frequency method

的瞬时频率在 I_a 正半周波时仍然保持在开关频率 4 kHz 左右, 由此可以进一步判断 A 相 T_1 管发生开路故障。

同样, 采用瞬时频率法对变流器其他相的功率管开路故障进行检测。图 9 为仿真中对 B 相功率器件 T_3 开路故障的检测结果。 T_3 开路故障的发生时刻为 1.3 s。值得注意的是, B 相电流在 1.3 s 时位于正半周波, 其主要是通过 T_6 和 D_3 通流。 T_3 开路在 $I_b > 0$ 时并不会立刻影响 B 相电流的运行状态。B 相电流波形及其开关模态分量的瞬时频率没有立刻发生畸变。在 1.306 s 时 B 相电流 I_b 降为 0, 此后通过 T_3 和 D_6 进行通流。由于 T_3 发生开路故障, 使得 I_b 通流受限。如图 9 所示, 在 1.306 s 时 I_b 电流发生畸变, 同时其开关模态分量的瞬时频率也发生突变, 在几个开关周期内从 4 kHz 增加至 8 kHz。A、C 两相开关模态分量的瞬时频率无明显变化。图 9 中 B 相电流开关模态分量瞬时频率的畸变主要发生在电流负半周, 而在 B 相电流正半周波维持在开关频率 4 kHz 附近, 与前文理论分析相一致。

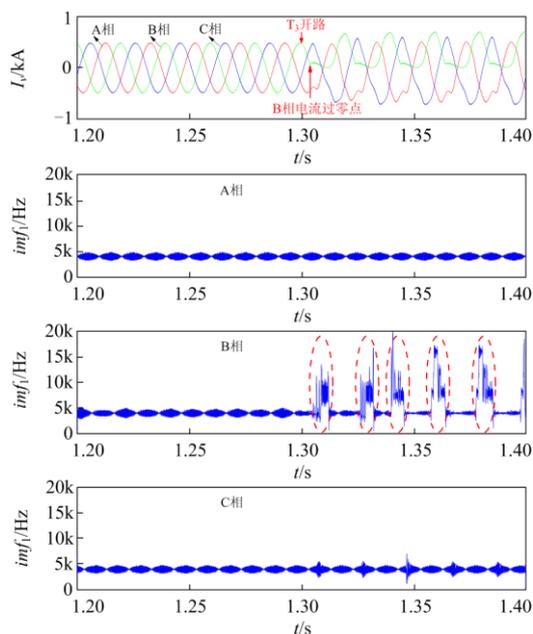


图 9 VSC 3 中 T_3 开路故障的瞬时频率法检测结果
Fig. 9 Detection result of T_3 open circuit fault in VSC 3
by the instantaneous frequency method

综上所述, 变流器功率器件发生开路故障时会使得该相电流在半个周波发生通流受限, 相应的开关模态分量瞬时频率也在该半个周波发生显著增加。考虑到实际运行中变流器的开关频率一般保持不变, 通过设置开关模态分量的瞬时频率阈值(如 1.5~2)可以有效检测出变流器功率器件开路故障。

3.3 多个功率管开路故障检测仿真验证

为了验证本文所提出的瞬时频率法对变流器多个功率器件开路故障的检测效果, 进一步地利用开关模态分量的瞬时频率特征对 A 相 T_1 和 C 相 T_5 多个功率管开路故障进行检测。功率管 T_1 和 T_5 发生开路故障的时刻分别为 1.2 s 和 1.3 s, 且它们均发生在变流器电流 I_a 和 I_c 的负半周波。图 10 为瞬时频率法的开路故障检测结果。图 10 中 A 相电流的开关模态分量瞬时频率在 1.2 s 前保持正常为 4 kHz。在 1.2 s 后 A 相电流发生严重畸变, 其相应的瞬时频率特征快速增加至 8 kHz。同样, C 相电流的开关模态瞬时频率在 1.3 s T_5 发生开路故障后显著增加。从图 10 中还可以看出, T_1 和 T_5 开路故障时, B 相电流的开关模态瞬时频率基本保持稳定; A 相和 C 相电流开关模态分量瞬时频率在 T_1 和 T_5 开路故障后的特征畸变(增加一倍以上)均发生在相电流的负半周, 而在相电流的正半周稳定在开关频率 4 kHz, 表明 A 相和 C 相功率管 T_1 和 T_5 发生开路故障。仿真结果验证了利用本文所提出的瞬时频率法不仅可以快速检测功率器件开路故障的发生时刻, 而且能够检测出变流器多个功率器件的开路故障。

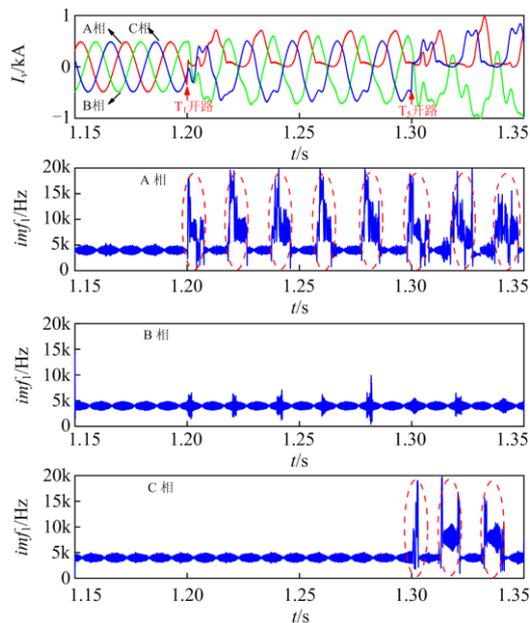


图 10 VSC 3 中 T_1 和 T_5 开路故障的瞬时频率法检测结果
Fig. 10 Detection result of both T_1 and T_5 open circuit faults
in VSC 3 using the instantaneous frequency method

3.4 功率管开路故障检测鲁棒性验证

考虑到电力电子具有高可控性, 其动态调整过程十分迅速。而变流器交流侧三相电流的动态变化过程, 可能会干扰利用电流特征进行开路故障检测

的准确性。本文从 VSC 的功率调整和潮流反转两个方面对瞬时频率法的动态检测性能进行验证。图 11 给出了 VSC 3 正常工作时,在 1.2 s 时功率从 50 MW 减少至 30 MW,1.26 s 功率从 30 MW 增加至 50 MW 的检测结果。图 12 给出了 VSC 3 正常工作时在 1.2 s 时进行潮流反转(30 MW 至-30 MW)的检测结果。

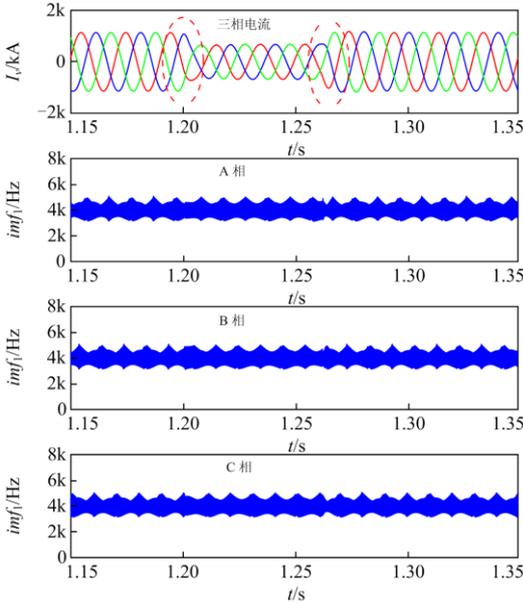


图 11 变流器功率调整时的检测结果

Fig. 11 Detection result of the instantaneous frequency method under converter power adjustment

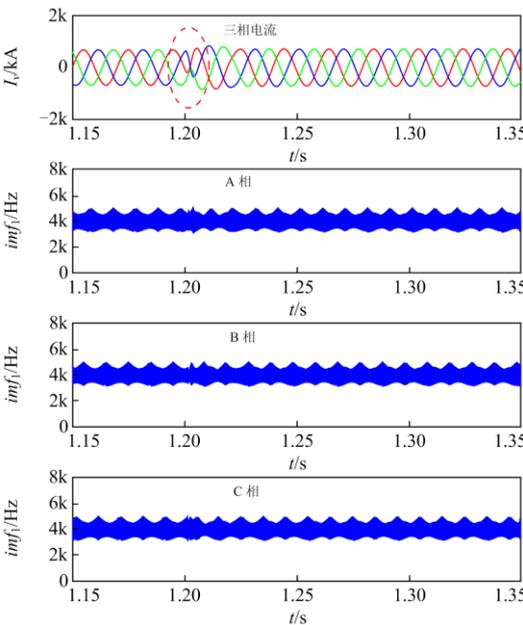


图 12 变流器潮流反转的检测结果

Fig. 12 Detection result of the instantaneous frequency method under current inversion of the VSC

如图 11 所示,在 VSC 3 进行功率调整时,在 1.2 s 和 1.26 s 时刻均出现电流动态变化的过程。而三相电流中开关模态分量的瞬时频率均无发生突变现象,即检测方法没有出现误动作。根据图 12 可知,VSC 3 进行潮流反转时,会出现瞬时的电流波形畸变,如红色圆圈所示。图 12 表明,在潮流反转时不会造成误诊断。因此,利用开关模态分量瞬时频率的特征变化检测功率器件的开路故障具有良好的动态检测性能和鲁棒性。

4 结论

本文分析了电压源变流器中三相电流包含的固有模态分量,提出基于开关模态电流分量瞬时频率的变流器功率器件开路故障检测方法,并通过仿真进行了验证。仿真结果表明:

1) 功率器件开路会导致变流器三相电流中的开关模态分量特征改变,利用开关模态分量的瞬时频率特征变化能够在几个开关周期内快速检测出单个或多个功率器件的开路故障。

2) 开关模态分量瞬时频率特征对变流器电流幅值变化不敏感,在功率调整和潮流反转时不会出现误动作,本文所提出的瞬时频率开路故障检测法具有较好的动态检测性能和鲁棒性。

参考文献

[1] 李婷, 胥威汀, 刘向龙, 等. 含高比例可再生能源的交直流混联电网规划技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 177-187.
 LI Ting, XU Weiting, LIU Xianglong, et al. Review on planning technology of AC/DC hybrid system with high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 177-187.

[2] 庞博, 侯丹, 李天瑞. 中压多端口电力电子变压器技术研究[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 1-9.
 PANG Bo, HOU Dan, LI Tianrui. Analysis of medium voltage multi-port power electronic transformer technology[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 1-9.

[3] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.

[4] 王金凤, 李壮壮, 邓国民, 等. 含电动汽车的交直流混合微网优化调度[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(3): 1-8.
 WANG Jinfeng, LI Zhuangzhuang, DENG Guomin, et al. Optimal scheduling for AC-DC hybrid microgrid with electric vehicles[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(3): 1-8.

[5] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3):

- 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [6] HE Jinghan, CHEN Keao, LI Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 151-165. DOI: 10.1186/s41601-020-00157-9.
- [7] 安群涛, 孙力, 孙立志, 等. 三相逆变器开关管故障诊断方法研究进展[J]. *电工技术学报*, 2011, 26(4): 135-144. AN Quntao, SUN Li, SUN Lizhi, et al. Recent developments of fault diagnosis methods for switches in three-phase inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, 26(4): 135-144.
- [8] YAZDANI A, SEPAHVAND H, CROW M L, et al. Fault detection and mitigation in multilevel converter STATCOMs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1307-1315.
- [9] JLASSI I, ESTIMA J O, SEJIR K E K, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [10] XIA Yang, GOU Bin, XU Yan. A new ensemble-based classifier for IGBT open-circuit fault diagnosis in three-phase PWM converter[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(4): 364-372. DOI: 10.1186/s41601-018-0109-x.
- [11] ZIDANI F, DIALLO D, BENBOUZID M E H, et al. A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(2): 586-593.
- [12] DE A R R L, JACOBINA C B, DA SILVA E R C, et al. Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(2): 587-593.
- [13] KARIMI S, GAILLARD A, POURE P, et al. FPGA-based real-time power converter failure diagnosis for wind energy conversion systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(12): 4299-4308.
- [14] 安群涛, 孙力, 赵克, 等. 基于开关函数模型的逆变器开路故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(6): 1-6. AN Quntao, SUN Li, ZHAO Ke, et al. Diagnosis method for inverter open-circuit fault based on switching function model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(6): 1-6.
- [15] 刘星, 姜睿智, 宋国兵, 等. 利用电流故障特征的大功率整流装置故障在线诊断方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 166-173. LIU Xing, JIANG Ruizhi, SONG Guobing, et al. An on-line fault diagnosis method for power rectifier device based on fault current characteristic[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 166-173.
- [16] 姚陈果, 李孟杰, 余亮, 等. 基于脉冲耦合响应的IGBT故障检测方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(15): 3235-3244. YAO Chenguo, LI Mengjie, YU Liang, et al. A condition detecting method for the IGBT module based on pulse coupling response[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(15): 3235-3244.
- [17] 于泳, 蒋生成, 杨荣峰, 等. 变频器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(9): 30-35. YU Yong, JIANG Shengcheng, YANG Rongfeng, et al. IGBT open circuit fault diagnosis method for inverter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(9): 30-35.
- [18] 李豪, 赵孟, 董志文, 等. VSC-MTDC 系统中 IGBT 开路检测方法研究[J]. *可再生能源*, 2019, 37(12): 1802-1808. LI Hao, ZHAO Meng, DONG Zhiwen, et al. Fault detection of IGBT open-circuit for VSC-MTDC system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(12): 1802-1808.
- [19] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(2): 75-84. SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(2): 75-84.
- [20] 梅樱, 孙大南, 韦中利, 等. 一种基于矢量控制的变流器故障诊断方法[J]. *电工技术学报*, 2010, 25(3): 177-182. MEI Ying, SUN Danan, WEI Zhongli, et al. An approach to converter faults diagnosis based on vector control[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, 25(3): 177-182.
- [21] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2003, 31(1): 417-457.
- [22] 黄建, 胡晓光, 巩玉楠. 基于经验模态分解的高压断路器机械故障诊断方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(12): 108-113. HUANG Jian, HU Xiaoguang, GONG Yunan. Machinery fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on empirical mode decomposition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(12): 108-113.
- [23] 骆玮, 王恒, 王磊, 等. 基于设备信息交互的小电流接地故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 73-82. LUO Wei, WANG Heng, WANG Lei, et al. Faulted line location method for distribution systems based on the equipment's information exchange[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 73-82.

收稿日期: 2020-06-28; 修回日期: 2020-09-17

作者简介:

雷兴(1980—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为城市能源互联网、柔性配电网等; E-mail: leixing@epri.sgcc.com.cn

郭睿(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: guoruixxx@sina.com

纪坤华(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配网精益化管理。

(编辑 许威)