

DOI: 10.7667/PSPC161630

STATCOM 主回路开关器件故障诊断

唐轶¹, 王扬¹, 赵红璐¹, 龚立峰²

(1. 中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221008; 2. 国网张家港市供电公司, 江苏 苏州 215600)

摘要: 提出一种针对 STATCOM 主回路开关器件 IGBT 和续流二极管的开路故障诊断的新方法。分析发生单管 IGBT 和续流二极管开路故障时, STATCOM 三相电流波形会发生相应的变化和缺失, 引出当某相 IGBT 或二极管开路时, 该相电流正(负)半波的无功功率会减小。将每相电流正负半波的无功功率的归一化值 S_r^m 作为特征值来判断故障所在相, 随后引入故障相电流四分之一周期功率差 $d_{1/4}$ 作为辅助特征值进一步区分 IGBT 和续流二极管的开路故障。最后仿真证明该方法不仅可以区分出单管 IGBT 和续流二极管的开路故障, 还可区分出部分 IGBT 和续流二极管双管开路故障, 且除去轻载状况下, 本方法不受负载波动的影响。

关键词: STATCOM; IGBT 开路; 二极管开路; 正负半波无功功率; 电流四分之一功率差

Fault diagnosis of main circuit switching device in STATCOM

TANG Yi¹, WANG Yang¹, ZHAO Honglu¹, GONG Lifeng²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China;

2. State Grid Zhangjiagang Power Supply Company, Suzhou 215600, China)

Abstract: This paper proposes a new solution to locate the open circuit fault of the switching device IGBT and diode in STATCOM. It's analyzed that part of the current waveform will change or miss, when the single IGBT and diode open circuit fault occur. So it can be concluded that the reactive power corresponding to the positive and negative current of one phase will reduce, when IGBT and diode open circuit fault occur in this phase. S_r^m , the normalized value of reactive power corresponding to the positive and negative current of each phase is used to locate the fault phase. Besides, $d_{1/4}$, 1/4 cycle power difference of the fault phase current, is utilized to help differ the IGBT fault from the diode fault. Simulation proves that it not only can differ the single IGBT fault from the single diode fault, but also can be adopted in part of the situation where two IGBTs fault or two diodes fault occur. Besides, it is load independent except in the light load condition.

Key words: STATCOM; IGBT open circuit fault; diode open circuit fault; reactive power corresponding to the positive and negative current; 1/4 cycle power difference

0 引言

STATCOM作为柔性交流输电系统的核心装置之一, 具有可靠性高、调节连续、速度快及损耗低等优点, 在电力系统中得到广泛的应用^[1-4], 并且对电能质量的提高、谐波的抑制、输电损耗的降低具有明显的优势^[5-6]。IGBT和续流二极管是构成STATCOM主回路的开关器件, 一旦出现故障, 整个装置不但不能正常运行, 有可能带来更大的灾害。开关器件故障可以分为两类: 短路故障和开路故障。对于IGBT的短路故障, 目前已有成熟的方案, 即通过硬件电路检测IGBT的D-S压降, 即可准确判别故

障管^[7], 或者串入快速熔断器, 即可将短路故障转化为开路故障。然而对于开路故障, 故障发生后, 一般装置可以继续运行, 不易察觉, 但已不能完成补偿功能, 进而暂态电压失稳^[8]。如不及时处理则会给电网产生危害, 重则会危及电网安全运行。

目前, 国内外提出的 IGBT 的开路故障诊断方法大多是针对变频器的, 变频器负载侧大多是电机, 只输出感性电流。而 STATCOM 交流侧接的是电网, 要能够输出感性或容性电流, 因此适用于变频器的方法不一定适用与 STATCOM^[9-12]。

目前常用的故障诊断方法有两大类, 基于信号处理的方法和基于数学模型的方法。基于信号处理

的方法主要是指基于电流和电压的诊断方法，文献[13-15]对直流侧电流进行 FFT 分析，利用其低频频谱作为故障特征进行诊断，但是该方法只能判断故障所在相，不能对故障管进行精确定位。文献[16]对变频器输出电压作双重傅里叶分析，利用其直流量以及奇偶次谐波进行故障定位。文献[17]通过将无故障时的某个电压量作为基准，将各故障情况下的该电压量与基准比较得到电压误差值。只是这里又将误差积分之后再和设定的另一个阈值相比，根据最终的误差积分所在的范围进行故障确定，可以实现对单个 IGBT 功率管的诊断。文献[18]根据正常与故障时电网中性点与直流侧负极之间电压不同，并提取该电压量作为特征值进行诊断。文献[19]通过对变频器三相电流正负半周对应的功率进行检测，并与设定的阈值进行比较，从而进行对故障管的定位。基于数学模型的诊断方法又包含基于观测器方法、参数估计法等数学方法。即需要首先建立故障对象的数学模型，通过该模型进行状态量的预测，并根据实际状态值跟预测值的差值来进行故障诊断。文献[20-22]通过建立电流回路模型进行线电压的预测，将测得的线电压与正常情况下线电压的差值作为特征值来进行故障诊断，该方法无需额外的传感器和硬件设备，也不受负载波动的影响，可以诊断出单管 IGBT 开路。此外，近年来智能算法的出现为故障诊断提供了新路径，该方法不需要建立数学模型，且诊断结果具有较好的鲁棒性和抗干扰性。文献[23]提出一种基于自适应权重粒子群 (AWPSO) 优化 BP 神经网络的光伏阵列故障诊断与定位方法，AWPSO 具有良好的全局搜索能力，弥补了 BP 神经网络学习过程收敛速度慢、鲁棒性不好的缺点，并且验证了 AWPSO 优化 BP 神经网络用于光伏阵列故障诊断与定位的可行性。文献[24]将 VSI 结构的变频电路的输出电流进行变换，提取低频能量系数值，然后再利用神经网络的方法进行故障管的诊断。文献[25-26]利用小波多分辨率的特性将母线电压进行多层分解后提取有效特征成分，再用 PSO 优化的最小二乘向量机对逆变器进行故障分类，实现了故障的诊断。

以上各文献提出的方法大多都只能针对单管 IGBT 开路故障进行诊断。对于文献[13-14, 19]利用电流量作为故障特征的方法，由于上管二极管和下管 IGBT 的电流方向一致，故当发生故障时二者的故障特征十分相近，因此这些方法并不能区分是 IGBT 还是续流二极管的开路故障。本文提出一种通过对每相正负半波电流无功功率归一化和计算电流 1/4 周期功率差的方法来对区分 IGBT 和续流二极管的开路故障。本文首先分析发生单管 IGBT 和

续流二极管开路故障时，STATCOM 三相电流波形会发生相应的变化和缺失，引出当某相 IGBT 或二极管开路时，该相正(负)半波电流的无功功率会减小。然后将每相电流正负半波的无功功率归一化作为特征值来判断故障所在相，随后引入故障相电流四分之一周期功率差作为辅助特征值进一步区分 IGBT 和续流二极管的开路故障。最后仿真证明该方法的有效性。

1 故障特征分析

图 1 为 STATCOM 主回路拓扑图，主回路开关器件开路故障分为两大类：IGBT 功率管开路和续流二极管开路。由于 STATCOM 有感性、容性两种工况，两种工况下功率管的开通顺序不同，故分开考虑。

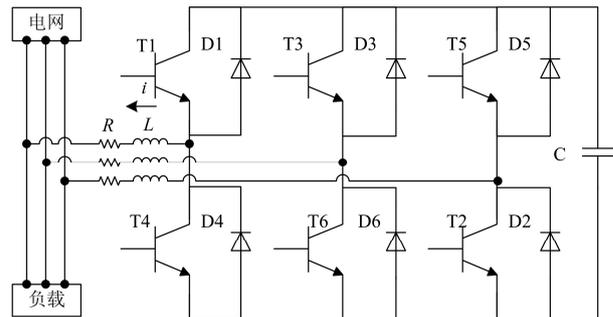


图 1 STATCOM 主回路拓扑图

Fig. 1 Main circuit topology of STATCOM

1.1 感性工况

电流正方向如图 1 所示，以 A 相为例，当电流 $i > 0$ 时，在一个开关周期内，电流先由 T1 管导通后再由 D4 管续流；当电流 $i < 0$ 时，电流先由 T4 管导通后再由 D1 管续流。发生 IGBT 单管开路时(以 T4 管为例)，当 $i > 0$ ，电流由 T1, D4 交替导通续流不受影响；当 $i < 0$ ，由于 T4 开路，电流经 D1 续流降至 0，直到 T1 管导通，电流为正。故 T1 开路时，稳态三相电流波形如图 2 所示，表现为 A 相负半波电流基本缺失。由于 A、B、C 三相互成回路，在 B、C 相作用下，在负半波的后四分之一周期，A 相会有少许流经 D1 管的负向电流。由上述分析得，此时 A 相负半波电流基本缺失，故其对应的无功功率基本为 0，而正半波电流和另两相正负半波电流对应的无功功率应该基本不变。

同样，发生二极管单管开路时(以 D1 为例)，当 $i > 0$ ，此时由 T1、D4 管交替导通，故电流不会受到影响；当 $i < 0$ ，此时 T4 的导通时间变短，负向电流无法达到峰值。当 T4 关断时，由于 D1 开路无法续

流, 故电流迅速跌至 0; 此后 T4 不停地开通关断, 电流在 0 附近波动, 直至电流进入正半周, 由 T1、D4 交替导通恢复正常。稳态三相电流波形如图 3 所示。由上述分析可得, 此时 A 相的负半波的无功功率较小, 正半波的功率变化不大。B、C 相虽然受到影响, 但其正负半波电流变化不是很大, 故其对应无功功率变化也不会太大。

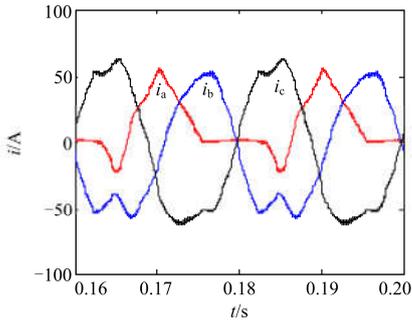


图 2 T4 管开路

Fig. 2 T4 open circuit fault

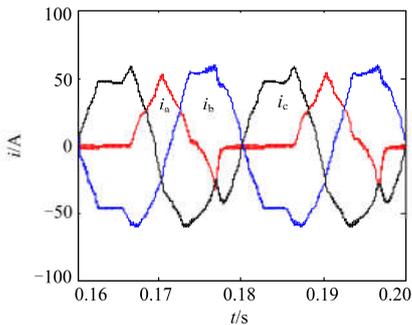


图 3 D1 管开路

Fig. 3 D1 open circuit fault

1.2 容性工况

以 A 相为例, 当电流 $i > 0$ 时, 在一个开关周期内, 电流先由 D4 管续流后再由 T1 管导通; 当 $i < 0$ 时, 电流先由 D1 管续流后再通过 T4 管导通。发生单管开路时(以 T4 为例), 当 $i > 0$ 时, 电流基本不受影响。当 $i < 0$ 时, 电流先由二极管 D1 续流, 由于 T4 管开路, 故电流再经 D1 管续流至 0, 直至 $i > 0$, 由 D4 管和 T1 管交替续流导通。其稳态三相电流如图 4 所示。此时 A 相负半波电流对应的无功功率较小, 正半波电流对应的无功功率变化不大。B、C 相虽然受到影响, 但其正负半波电流变化不是很大, 故其对应无功功率变化也不会太大。

同样以 A 相为例, 发生单二极管开路时(以 D1 为例), 若 $i > 0$, 此时由 D4、T1 管交替导通, 故电流不会受到影响; 若 $i < 0$, 由于 D1 开路无法续流,

而此时 T4 不停地开通关断, 所以电流会在 0 附近形成波动; 直至 T4 管正常导通时, 电流被拉到某个负值, 随后经 T4 管导通直至变为正, 由 D4、T1 管交替导通。稳态三相电流波形如图 5 所示。故 A 相的负半波电流对应的无功功率较小, 正半波电流对应的无功功率变化不大。B、C 相虽然受到影响, 但其正负半波电流变化不是很大, 故其对应无功功率变化也不会太大。

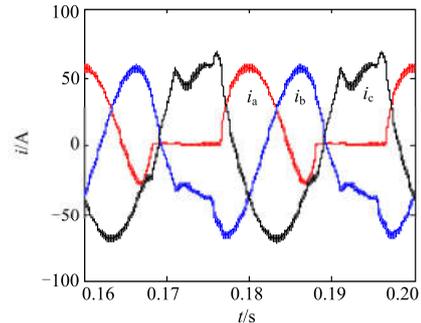


图 4 T4 管开路

Fig. 4 T4 open circuit fault

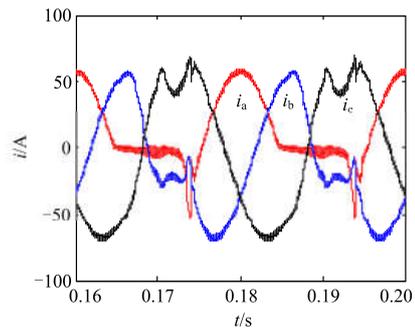


图 5 D1 管开路

Fig. 5 D1 open circuit fault

2 故障特征提取与识别

由上述分析可知, 当发生某相 IGBT 或续流二极管开路故障时, STATCOM 三相输出的每个周期的正或负半波电流会发生缺失, 其对应的无功功率也会发生相应的变化。下管的 IGBT 开路, 则该相负半波电流对应无功功率会减小; 上管续流二极管开路, 同样该相负半波电流对应无功功率会减小, 这与下管 IGBT 开路时很相近(见图 6 与图 7)。而正常情况下, STATCOM 每相输出的正负半波无功功率是差不多的, 所以只要比较这 6 个半波无功功率值, 即可判断是否发生了 IGBT 或续流二极管开路故障。因此, 本文定义每相正负半波无功功率与三相正负半波无功功率的绝对值的平均值的比值为判断 IGBT 或续流二极管开路故障的特征量。

$$S_l^m = \frac{Q_l^m}{|Q|} \quad (m = +, -; l \in (a, b, c)) \quad (1)$$

式中： Q_l^+ 、 Q_l^- 分别代表 STATCOM 某相正、负半波的无功功率； $|Q|$ 为三相正负半波无功功率的绝对值的平均值； $i_l(k)$ 为 STATCOM 某相输出电流； $u_l(k)$ 为与 $i_l(k)$ 同时刻采样的该相网侧电压； k 为第 k 个采样点； N 为一个周期采样点数，为 4 的倍数。将该相网侧电压的一个周期平均分成四个区间，网侧电压相位 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的为区间 I， $180^\circ \sim 270^\circ$ 的为区间 II， $270^\circ \sim 360^\circ$ 的为区间 III， $0^\circ \sim 90^\circ$ 的为区间 IV。 Q_{II} 、 Q_{III} 、 Q_{IV} 为该相四个区间分别对应的无功功率。计算方法为

$$Q_l^+ = Q_{II} + Q_{III} \quad (2)$$

$$Q_l^- = Q_{III} + Q_{IV} \quad (3)$$

$$|Q| = \frac{1}{6} (|Q_a^+| + |Q_a^-| + |Q_b^+| + |Q_b^-| + |Q_c^+| + |Q_c^-|) \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{II} = \frac{4}{N} \sum_{k=1}^{\frac{N}{4}} u_l(k - \frac{N}{4}) \cdot i_l(k) \\ Q_{III} = \frac{4}{N} \sum_{k=\frac{N}{4}+1}^{\frac{N}{2}} u_l(k - \frac{N}{4}) \cdot i_l(k) \\ Q_{III} = \frac{4}{N} \sum_{k=\frac{N}{2}+1}^{\frac{3N}{4}} u_l(k - \frac{N}{4}) \cdot i_l(k) \\ Q_{IV} = \frac{4}{N} \sum_{k=\frac{3N}{4}+1}^N u_l(k - \frac{N}{4}) \cdot i_l(k) \end{array} \right. \quad (5)$$

6 个 S_l^m 都对应一个 IGBT 或二极管的工作状况，如： S_a^+ 判断 A 相 T1 管或 D4 管是否开路， S_a^- 判断 A 相 T4 管或 D1 管是否开路，以此类推。且 S_l^m 为正则表明此时为感性工况，为负则表明此时为容性工况。故可以分别为感性工况和容性工况设置阈值 α 、 β ，当 $\beta < S_l^m < \alpha$ 时，表明其对应的 IGBT 或续流二极管发生了开路故障。

图 6、图 7 所示分别为发生 T4 管和 D1 管开路故障时，归一化值 S_l^m 随负荷变化的曲线图，负荷率为负代表容性工况，为正代表感性工况。本文设置阈值 α 、 β 分别为 0.2、-0.2。由图可得，当负荷率大于 0.2 时，本方法可以准确定位到故障发生在 A 相，但是还无法区分是 T4 还是 D1 开路。为进一步判断是 IGBT 开路故障还是续流二极管 D 开路故障，本文又引入了辅助特征量四分之一周期无功功率差值 d_{lx} ($x = 0, 1; l \in (a, b, c)$) 来进行判断，定义如下：

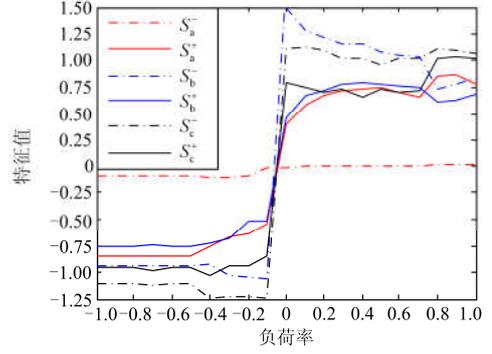


图 6 T4 管开路

Fig. 6 T4 open circuit fault

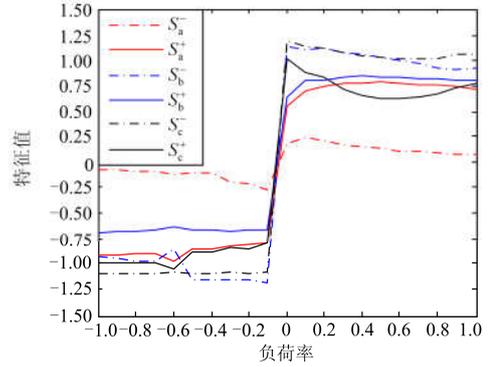


图 7 D1 管开路

Fig. 7 D1 open circuit fault

$$d_{I0} = Q_{III} - Q_{II} \quad (6)$$

$$d_{II} = Q_{IV} - Q_{III} \quad (7)$$

感性工况下发生 T4 和 D1 开路故障时的电流波形如图 2、图 3 所示。本文将 A 相电流分成如图 8、图 9 所示以下四个区间。

图中 $i_a(k)$ 为 A 相电流， $u_a(k)$ 为 A 相网侧电压， $u_a(k - \frac{N}{4})$ 为移相 90° 后的 A 相网侧电压，如上文所述，将 $i_a(k)$ 按照 $u_a(k)$ 的一个周期平均分成 I、II、III、IV 四个区间，四个区间对应的无功功率分别为 Q_{aI} 、 Q_{aII} 、 Q_{aIII} 、 Q_{aIV} 。当下管 IGBT4 开路时，由图 8 得，区间 III 的电流几乎为 0，而区间 IV 有少许经 D1 续流的负向电流，区间 I、II 的电流与正常时相差不大，由前文所述可得此时必有 $d_{aI} > 0$ ；当上管二极管 D1 开路时，由图 9 得，区间 III 有一段经 T4 导通的负向电流，区间 IV 的电流比较小，此时必有 $d_{aI} < 0$ ，如图 10 所示。

若是上管 IGBT1 开路时，由于对称性，此时必有 $d_{a0} > 0$ ；同理，对于下管二极管 D4 开路，此时必有 $d_{a0} < 0$ 。

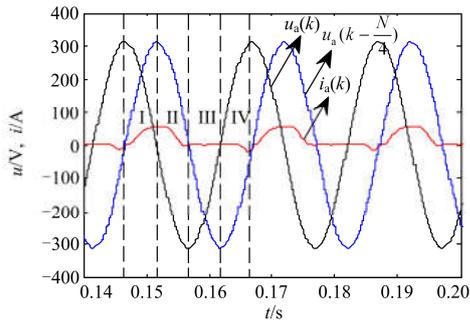


图 8 T4 管开路

Fig. 8 T4 open circuit fault

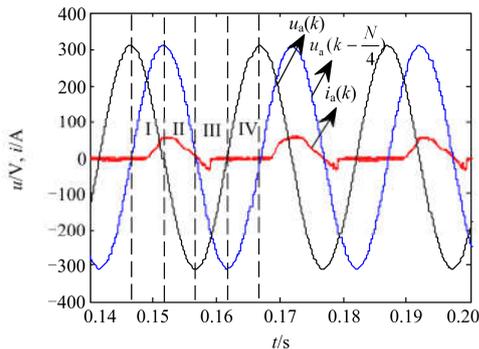


图 9 D1 管开路

Fig. 9 D1 open circuit fault

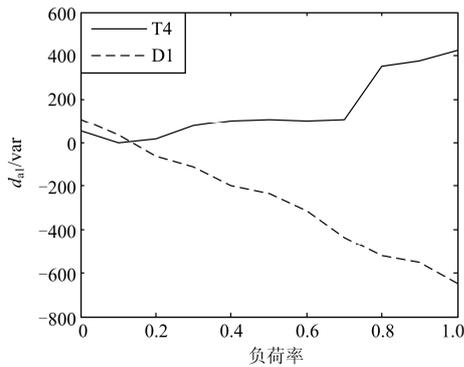
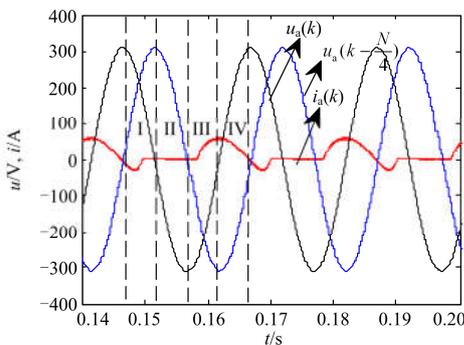
图 10 d_{a1} 随负荷变化Fig. 10 d_{a1} with load change

图 11 T4 管开路

Fig. 11 T4 open circuit fault

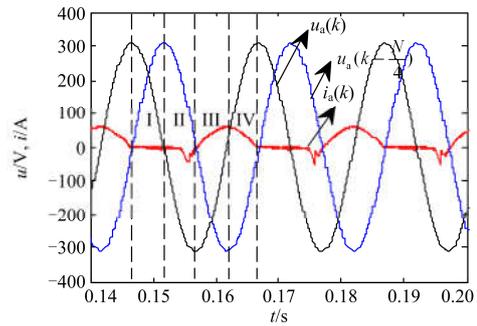
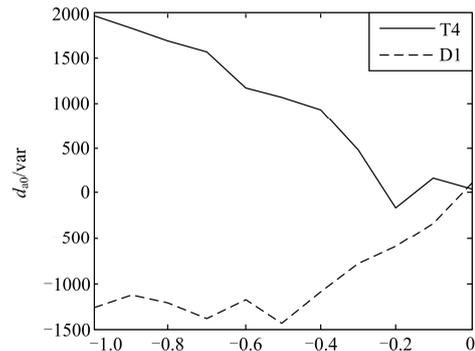


图 12 D1 管开路

Fig. 12 D1 open circuit fault

容性工况下发生 T4 和 D1 开路时电流波形如图 4、图 5 所示。同样将 A 相电流分成如图 11、图 12 所示的四个区间。

当 T4 管开路时, 区间 I 的电流有一段为负, 区间 II 的电流基本为 0, 由前文所述此时必有 $d_{a0} > 0$; 而 D1 管开路时, 区间 I 的电流几乎为 0, 区间 II 的电流有一段比较大, 此时有 $d_{a0} < 0$, 如图 13 所示。

图 13 d_{a0} 随负荷变化Fig. 13 d_{a0} with load change

若是上管 IGBT1 开路时, 同样由于对称性, 此时必有 $d_{a1} > 0$; 同理, 对于下管二极管 D4 开路, 此时必有 $d_{a1} < 0$ 。故本文为 d_{lx} 设置阈值 $\gamma = 0$, 来区分 IGBT 和续流二极管的开路故障。

感性和容性工况下, 故障管位置与 S_l^m 、 d_{lx} 的对应关系如表 1 所示。

综上所述, STATCOM 主回路开关器件故障定位诊断流程图如图 14 所示。

3 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 搭建容量为 30 kvar 的 STATCOM, 采样频率为 6400 Hz, 分别在负荷率为 -1 到 1, 间隔 0.1 变化下进行 IGBT/续流二极管开路实验。

表 1 故障管与 S_i^m, d_{ix} 对应关系

Table 1 S_i^m, d_{ix} corresponding to the fault tube

| 工况 | 故障位置 | S_i^m | d_{ix} |
|----|---------|--------------------|--------------|
| 感性 | 上管 IGBT | $0 < S_i^+ < 0.2$ | $d_{i0} > 0$ |
| | 下管二极管 | $0 < S_i^+ < 0.2$ | $d_{i0} < 0$ |
| | 下管 IGBT | $0 < S_i^- < 0.2$ | $d_{i1} > 0$ |
| 容性 | 上管二极管 | $0 < S_i^- < 0.2$ | $d_{i1} < 0$ |
| | 上管 IGBT | $-0.2 < S_i^+ < 0$ | $d_{i1} > 0$ |
| | 下管二极管 | $-0.2 < S_i^+ < 0$ | $d_{i1} < 0$ |
| | 下管 IGBT | $-0.2 < S_i^- < 0$ | $d_{i0} > 0$ |
| | 上管二极管 | $-0.2 < S_i^- < 0$ | $d_{i0} < 0$ |

表 2 诊断正确率

Table 2 Diagnostic accuracy

| 负荷率 | 正确率 | 负荷率 | 正确率 |
|------|------|-----|------|
| -1 | 100% | 1 | 100% |
| -0.9 | 100% | 0.9 | 100% |
| -0.8 | 100% | 0.8 | 100% |
| -0.7 | 100% | 0.7 | 100% |
| -0.6 | 100% | 0.6 | 100% |
| -0.5 | 100% | 0.5 | 100% |
| -0.4 | 100% | 0.4 | 100% |
| -0.3 | 100% | 0.3 | 100% |
| -0.2 | 20% | 0.2 | 10% |
| -0.1 | 10% | 0.1 | 10% |

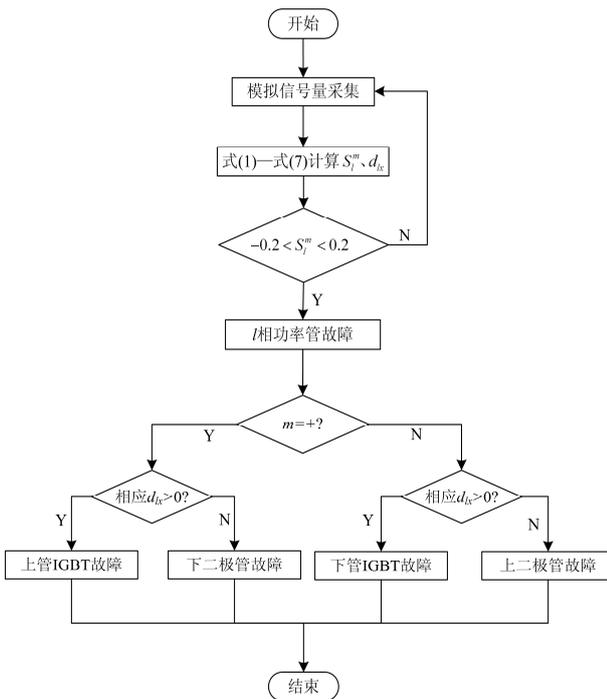


图 14 诊断流程图

Fig. 14 Diagnostic flow chart

3.1 单管开路

以 A 相为例，发生 T4 开路故障或 D1 开路故障时，特征值 S_i^m 随负荷率变化的曲线图分别如前文图 6、图 7 所示。此时有 $-0.2 < S_a^- < 0.2$ ，根据前文所述故判断此时为 A 相上管二极管 D1 开路或是下管 IGBT T4 开路。本文选取故障后不同的 10 个周期分别按照前文所述方法来区分 T4 和 D1 的开路故障，其正确率与负荷率关系如表 2 所示。

由表 2 中可得，在负荷率大于 0.2 时，本文所述方法均可以正确区分 T4 和 D1 的开路故障。但负荷率小于 0.2 时，即在轻载工况下，诊断可靠性大大降低。

3.2 双管开路

双管开路的情况比较复杂，包括双 IGBT 开路，双二极管开路以及一个 IGBT 一个二极管开路三大类。其中双 IGBT 或者双二极管开路可以分为以下几类：同相上下故障(T1T4 或 D1D4)，异相同侧故障(T1T3 或 D1D3)，异相异侧故障(T1T6 或 D1D6)。一个 IGBT 一个二极管故障可以分为以下几类同相同侧故障(T1D1)，同相异侧故障(T1D4)，异相同侧故障(T1D3)，异相异侧故障(T1D6)。本文所提出的诊断方法对上述故障部分适用，其具体诊断结果如表 3 所示。

表 3 诊断结果

Table 3 Diagnostic result

| 故障类型 | 诊断结果 | 负荷率范围 |
|------|------|----------------|
| T1T3 | 诊断到相 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| T1T4 | 准确定位 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| T1T6 | 准确定位 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| D1D3 | 诊断错误 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| D1D4 | 诊断到相 | 0.3~1, -0.2~-1 |
| D1D6 | 诊断到相 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| T1D1 | 诊断到相 | 0.3~1, -0.2~-1 |
| T1D4 | 诊断错误 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| T1D3 | 诊断错误 | 0.2~1, -0.2~-1 |
| T1D6 | 准确定位 | 0.3~1, -0.3~-1 |

4 结论

针对 STATCOM 主回路开关器件 IGBT 和续流二极管的开路故障，本文提出通过检测其每相输出的正负半波无功功率的诊断方法。通过对故障时输出电流的分析，得出每相电流正负半波的无功功率反应相应 IGBT 和续流二极管的工作状况，对每相电流正负半波的无功功率进行归一化处理得到特征值 S_i^m ，以此来对故障相进行定位；再计算故障相电流四分之一周期无功功率差 $d_{ix}(x=0, 1)$ ，通过相应

的 d_{α} 的正负来确定故障相故障管的具体位置。本方法有以下优点:

(1) 能够准确定位到单管 IGBT 故障和二极管故障, 对大部分双管开路故障诊断也有效。

(2) 除了轻载状况下, 由于负荷电流很小容易造成测量误差而误判外, 负载的变化不会引起误诊断。

(3) 由于采用补偿电流的正负半波电流对应的无功功率作为故障特征值, 本方法不需要增加任何硬件, 适用于各种控制策略的 STATCOM 主元件的故障诊断。

参考文献

- [1] 李广磊, 李笋, 孙树敏, 等. 基于 STATCOM 和 LCC-MTDC 技术的大规模风电并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 32-39.
LI Guanglei, LI Sun, SUN Shumin, et al. Research on LCC-MTDC and STATCOM technology for wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 32-39.
- [2] 潘汉广, 王军, 宋勇辉. 多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 136-142.
PAN Hanguang, WANG Jun, SONG Yonghui. Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 136-142.
- [3] 郭三明, 孙鹏荆, 敬树仁, 等. 基于预测模型的 STATCOM 功率控制策略建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 88-92.
GUO Sanming, SUN Pengjing, JING Shuren, et al. Research on modeling and simulation of power control method for STATCOM based on predictive model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 88-92.
- [4] 陈奎, 周东, 孙建坡. 基于序分量法的 D-STATCOM 直接功率控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 43-49.
CHEN Kui, ZHOU Dong, SUN Jianpo. Study on predictive direct power control of D-STATCOM based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 43-49.
- [5] 梅永振, 王海云, 常鹏, 等. STATCOM 对输电系统及受端电能质量的影响[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 1-6.
MEI Yongzhen, WANG Haiyun, CHANG Peng, et al. Influence of STATCOM on power quality of transmission system and receiving-end[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 1-6.
- [6] 陈国富. 统一电能质量控制器的无功功率协调控制策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 11-14.
CHEN Guofu. Reactive power compensation control strategy of UPQ[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 11-14.
- [7] 任磊, 韦微, 龚春英, 等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3089-3101.
REN Lei, WEI Zheng, GONG Chunying, et al. Fault feature extraction techniques for power devices in power electronic converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3089-3101.
- [8] 侯建兰, 马冰, 刘育权, 等. 电网暂态电压稳定的主要影响因素量化分析[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(6): 28-34.
HOU Jianlan, MA Bing, LIU Yuquan, et al. Quantitative analysis of main factors influencing transient voltage stability of power grid[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(6): 28-34.
- [9] MENDES A M S, MARQUES CARDOSO A J. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drives, by the average current park' s vector approach[C] // Proceedings of the 1998 7th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. London, UK: IEEE, 1998: 538-543.
- [10] CASEIRO J AA, CARDOSO A J M. Fault diagnosis on a PWM rectifier AC drive system with fault tolerance using the average current park' s vector approach[C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Miami, FL, USA: IEEE, 2009: 695-701.
- [11] ABRAMIK S, SLESZYNSKI W, NIEZNANSKI J, et al. A diagnostic method for on-line fault detection and localization in VSI-fed AC drives[C] // Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, CD-ROM.
- [12] 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.
- [13] 赵杰, 张艳霞, 宣文博, 等. 分布式电源中逆变器的故障特征和保护方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 51-54.
ZHAO Jie, ZHANG Yanxia, XUAN Wenbo, et al. Fault

characteristics and protection scheme of distributed generation inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 51-54.

[14] 杨忠林, 吴正国, 李辉. 基于直流侧电流检测的逆变器开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 18-22.

YANG Zhonglin, WU Zhengguo, LI Hui. Inverter fault diagnose based on detecting DC side current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 18-22.

[15] 杨忠林. 基于小波包分解的逆变器单管开路故障分析[J]. 电器与能效管理技术, 2010(23): 53-57.

YANG Zhonglin. Open fault analysis for one transistor of inverter based on wavelet packet decomposition[J]. Electrical & Management Technology, 2010(23): 53-57.

[16] 韩丽, 罗朋, 汤家升, 等. 基于 H 桥逆变器的 IGBT 开路故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 163-171.

HAN Li, LUO Peng, TANG Jiasheng, et al. Fault diagnosis research based on the H bridge inverter IGBT open circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 163-171.

[17] BROUJI H E, POURE P, SAADATE S. A fast reliable fault diagnosis method for fault tolerant shunt three-phase active filter[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Quebec, Canada, 2006: 1688-1693.

[18] 耿乙文, 李伟, 王凯. 一种三相光伏并网逆变器故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊 1): 203-209.

GENG Yiwen, LI Wei, WANG Kai. A fault diagnosis method for three-phase photovoltaic grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 203-209.

[19] 赏昊俊, 何正友, 胡海涛, 等. 基于 IGBT 输出功率的逆变器开路故障诊断方法[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1140-1145.

SHANG Wujun, HE Zhengyou, HU Haitao, et al. An IGBT output power-based diagnosis of open-circuit fault in inverter[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1140-1145.

[20] CSEIRO L M A, MENDES A M S. Real-time IGBT open-circuit fault diagnosis in three-level neutral-point-clamped voltage-source rectifiers based on instant voltage error[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(3): 1669-1678.

[21] CASEIRO L M A, MENDES A M S. Real-time multiple IGBT open-circuit fault diagnosis in three-level neutral-point-clamped converters with no additional sensors[C] // Industrial Electronics Society, IECON 2015, Conference of the IEEE: IEEE, 2015.

[22] CASEIRO L M A, MENDES A M S. Generalized IGBT open-circuit fault diagnosis algorithm with no additional sensors for grid-connected N-level NPC converters[C] // Industrial Electronics Society, IECON 2015, Conference of the IEEE: IEEE, 2015.

[23] 沈桂鹏, 杨店飞, 郭宇杰. 基于自适应权重粒子群优化 BP 神经网络的光伏阵列故障诊断与定位[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 23-32.

SHEN Guipeng, YANG Dianfei, GUO Yujie. Fault diagnosis & location of photovoltaic array based on BP neural network trained by adaptive inertia weight particle swarm optimization algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 23-32.

[24] CHARFI F, SELLAMI F, AL HADDAD K. Fault diagnostic in power system using wavelet transforms and neural networks[C] // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, Quebec, Canada, 2006: 1143-1148.

[25] 杨晓冬, 王崇林, 史丽萍. H 桥逆变器 IGBT 开路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(5): 112-118.

YANG Xiaodong, WANG Chonglin, SHI Liping. Study of IGBT open-circuit fault diagnosis method for H-bridge inverter[J]. Electric Machines & Control, 2014, 18(5): 112-118.

[26] 杨晓冬, 史丽萍, 夏正龙. 静止同步补偿器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 199-206.

YANG Xiaodong, SHI Liping, XIA Zhenglong. IGBT open circuit fault diagnosis method for static synchronous compensators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 199-206.

收稿日期: 2016-09-28; 修回日期: 2017-01-04

作者简介:

唐 轶(1957—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统自动化和电能质量控制; E-mail: tangyi@cumt.edu.cn

王 扬(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子器件故障诊断. E-mail: 625744383@qq.com

(编辑 姜新丽)