

基于故障树分析法的风电机组变频器故障与可靠性研究

刘 姝, 王鹤岩, 曹福毅, 刘 岩

(沈阳工程学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 针对风电机组变频器发生故障的频率, 使用 MATLAB 软件对故障进行分析。基于变频器故障的层次性, 构建变频器故障树作为一种层次化模型, 结合可靠性分析理论, 计算得到变频器相应的检修年限, 同时结合变频器各部件重要度提出针对变频器的合理化检修措施, 合理安排检修周期, 提升其检修效率。此外, 为解决变频器可能出现的历史数据采集比较困难的问题, 通过引入模糊逻辑和模型, 使变频器故障树具有处理模糊信息的能力, 基于 T-S 模糊故障树对变频器进行可靠性分析, 解决变频器事件和故障机理的不确定性问题, 为风电机组变频器实现可靠性分析增添新的依据。

关键词: 变频器; 故障树; 故障仿真; 可靠性分析

Study on frequency converter fault and reliability of wind turbine based on fault tree analysis

LIU Shu, WANG Heyan, CAO Fuyi, LIU Yan

(Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: Aiming at the frequency of wind turbine frequency converter failure, MATLAB software is used to analyze the failure. Based on frequency converter fault gradation, construction of frequency converter fault tree as a kind of hierarchical model, combined with the theory of reliability analysis, calculate the fixed number of year of the corresponding maintenance frequency converter, at the same time combined with frequency converter components importance in view of the frequency converter and reasonable maintenance measures, reasonable arrangement of maintenance cycle, improve the maintenance efficiency. In addition, in order to solve the difficulty of historical data acquisition of frequency converter, fuzzy logic and model are introduced to make the frequency converter fault tree have the ability to deal with fuzzy information. Reliability analysis of frequency converter is carried out based on T-S fuzzy fault tree to solve the uncertainty of frequency converter events and fault mechanism. It adds new basis for reliability analysis of wind turbine frequency converter.

Key words: frequency converter; fault tree; fault simulation; reliability analysis

0 引言

世界各地的各种工况下得到了广泛的应用。在运行过程中, 可能会面临环境温度过高或过低、湿

辽宁省教育厅一般项目 (JL-2014); 辽宁省科技厅重点研发计划指导计划项目 (2019JH8/10100064)

度过高、电压瞬变和中断等环境压力^[1]。在复杂多样的电磁环境中容易出现故障,这将给风电机组运行和电能质量造成一系列不利影响,严重时甚至对操作人员生命安全构成威胁。提高可再生能源发电系统的能源效率和可靠性,一直是行业内主要的研究方向之一。针对变频器实现合理检修、降低维护成本,对提高风电机组运行可靠性与安全性意义重大。

针对风电机组变频器的常见故障问题,利用MATLAB软件可以模拟变频器运行中常见的故障。对各种故障进行分类总结,基于常见故障事件构建变频器故障树,对风电机组变频器进行可靠性分析。根据底事件故障概率,可计算出变频器的平均无故障时间,并制订合理的检修计划。然而,在可靠性分析过程中,可能面临难以获得历史数据和不确定故障机制的问题,基于T-S模糊故障树分析法可弥补传统故障树的不足,解决相关问题。

1 变频器故障与可靠性研究现状

变频器故障研究很多集中于故障诊断。故障诊断技术应用于多个领域,具有重要意义,主要发展于20世纪中期,利用诊断系统对各种状态信息和知识进行综合处理,进而综合评价出系统运行和故障状态^[2]。变频器故障诊断技术是通过多种方式分析变频器的运行状态,诊断各个故障类型及原因,对未来可能发生的状况进行预测,制定相关对策。文献[3]中列举了多种诊断技术,比如基于神经网络、基于专家系统和基于信息融合等的多种方法。文献[4]针对高压变频器故障现象提出一种方法,主要是采用信息化系统对其进行分析。文献[5]采用了一种基于因子分析的方法。文献[6]主要采用基于紧致小波神经网络的方法,这种诊断方式获得了更好的优越性。文献[7]中提出采用基于遗传算法和支持向量机的诊断方式。

变频器可靠性研究目前相对较少,文献[8]针对变频器的可靠性采用一种基于RBD的方法,文献[9]从设计选型以及运行过程分别进行可靠

性分析,提出分析变频器可靠性的方法。

2 变频器故障分析

常见的变频器结构包含整流模块与逆变模块,如图1所示。

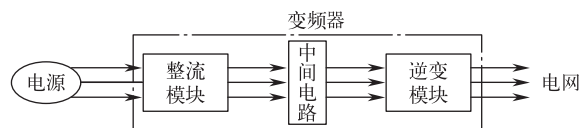


图1 变频器基本结构

Fig. 1 Basic structure of frequency converter

变频器故障种类繁多,产生各种故障的原因也有很多,进行故障分类时通常情况下可按以下几方面划分^[10],见表1。

表1 变频器故障分类

Tab. 1 Frequency converter fault classification

按可靠性划分	按故障发生的性质划分	按故障间关系划分	按发生部位划分
突发性故障	永久性故障	单个故障	电源故障
间歇性故障	偶发性故障	多个故障	内部故障
老化性故障		主故障	负载故障
		从属故障	

主电路作为变频器核心部分,含有很多晶闸管器件,易发生故障,常作为故障研究的重点。以变频器整流侧电路仿真为例,构建变频器整流侧仿真模型,如图2所示,频率设置为工频50 Hz,并设置相应的触发角,选取适宜的步长进行仿真并对其进行分析^[11-14]。

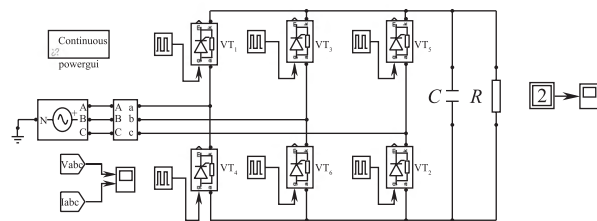


图2 Simulink下的变频器整流侧电路模型

Fig.2 Rectifier side circuit model of frequency converter in Simulink

图3为变频器整流侧正常运行状态下输出的波形;当单器件故障时,如 VT_1 失效,输出波形如图4所示;当多个器件同时故障时,如 VT_1 、

VT₃同时处于故障状态,输出波形如图5所示;VT₃、VT₆同时处于故障状态,输出波形如图6所示;VT₁、VT₆同时处于故障状态,输出波形如图7所示;当有三只晶闸管同时故障时,如VT₃、VT₅、VT₆同时故障,输出的波形如图8所示。

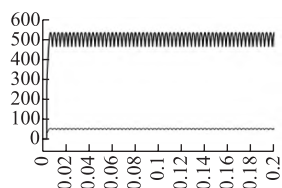


图3 正常状态波形
Fig. 3 Normal waveform

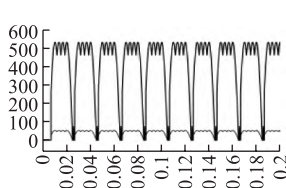


图4 VT₁故障波形图
Fig. 4 VT₁ fault waveform

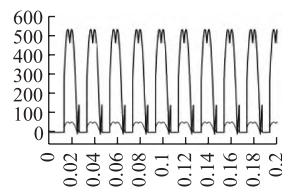


图5 VT₁、VT₃故障波形图
Fig. 5 VT₁、VT₃ fault waveform

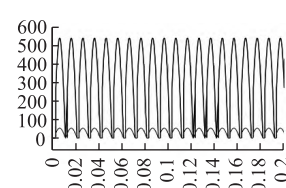


图6 VT₃、VT₆故障波形图
Fig. 6 VT₃、VT₆ fault waveform

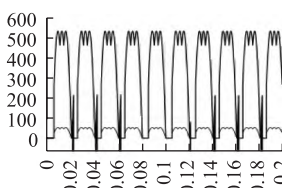


图7 VT₁、VT₆故障波形图
Fig. 7 VT₁、VT₆ fault waveform

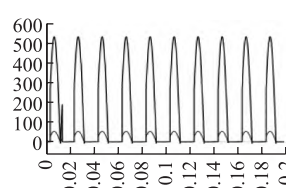


图8 VT₃、VT₅、VT₆故障波形图
Fig. 8 VT₃、VT₅、VT₆ fault waveform

通过仿真可知,变频器整流侧发生不同故障时,电压电流波形变化明显。利用MATLAB软件仿真,根据变频器输出电压、电流的变化,或同时结合其他多种信号的改变,可作为判断变频器故障类型的依据之一。

3 变频器可靠性研究

风电机组变频器是保证电能可靠输送的关键因素之一,由于大多数研究都集中在变压器的故障诊断和可靠性分析上,对变频器可靠性分析的研究相对较少,在对变频器的研究中一般只用故

障树作为诊断依据。本文以故障树作为变频器可靠性分析方法,从两方面展开,对变频器可靠性分析如下。

3.1 基于故障树分析法

故障树分析法多用于安全系统,在研究对电话拨号器自动控制系统时,首次提出这一方法,广泛应用于事故原因分析及风险评估。作为一个结构为树形图的故障树,其节点间有一定的逻辑关系,由底至上分别为底事件、中间事件和顶事件。搭建故障树时,起始于底部,写出上下层之间的逻辑关系,结合逻辑运算算法进行分析,删除冗余事件,形成完整的故障树^[15]。其逻辑门与各主要事件的代表符号及说明见表2。

表2 主要事件与逻辑门符号及说明

Tab. 2 Main event and logic gate symbol and description

名称	符号	含义说明
顶事件		故障树根节点
事件符号	中间事件	顶事件与底事件间的事件
底事件		故障机理明确且发生概率已知
逻辑门符号	或门	需最少产生一个输入事件,或门才起作用

通过逐步倒置细化分析的方式进行定性以及定量分析^[16],进而确定出导致变频器发生故障的多种可能组合模式及故障发生的概率情况,提出合理检修年限。建立变频器故障树步骤如图9所示。基于风电机组变频器常见的相关故障,构建变频器故障树^[17],如图10所示。

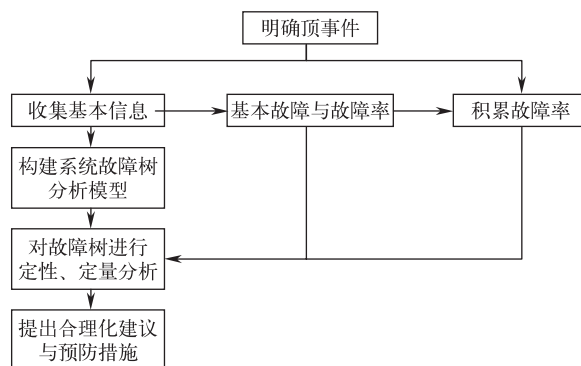


图9 故障树建立步骤图

Fig. 9 Steps of fault tree establishment

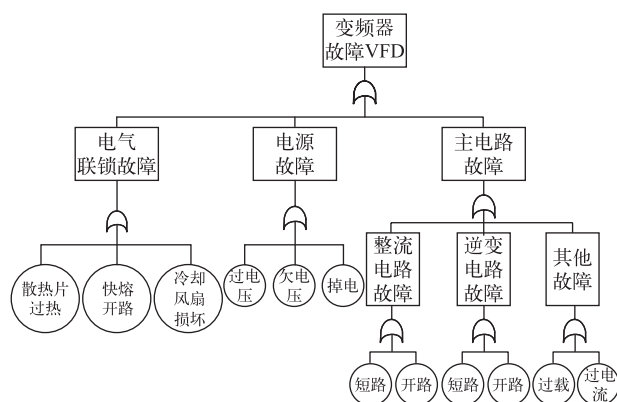


图 10 变频器故障树

Fig. 10 Frequency converter fault tree

对变频器进行可靠性分析^[18]：可靠性指标包含失效率、变频器可靠度和平均无故障时间等。其中，可靠度 R_T 是设备变频器能够稳定运行一段时间不会故障的概率，并且故障概率与可靠度的总和恒为1；而失效率 λ 代表变频器在单位时间内产生故障状态的概率，即

$$\lambda = \frac{\text{故障设备数量}}{\text{总设备数量}} \quad (1)$$

以底事件为开端，逐级推导，由下至上经各逻辑门得出顶事件的发生概率。设每个底事件发生概率为 $P(1)$, $P(2)$, $\dots$, $P(n)$ ，则顶事件即变频器发生故障的概率 $P(VFD)$ 、变频器可靠度 $R(VFD)$ 为

$$P(VFD) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(i)) \quad (2)$$

$$R(VFD) = [1 - P(1)][1 - P(2)] \dots [1 - P(n)] \quad (3)$$

本文假设某批次变频器故障树其各底事件的故障概率取值分布见表3。

表 变频器底事件故障概率分布

Tab. 3 Frequency converter bottom event probability distribution table

故障类型	底事件	失效率
电气连锁故障	散热片过热	0.032 9
	快熔开路	0.035 3
	冷却风扇损坏	0.036 2
电源故障	过电压	0.055 4
	欠电压	0.053 7
	掉电	0.034 1
主电路故障 (整流电路故障)	短路	0.048 2
	开路	0.053 1

(续)

故障类型	底事件	失效率
主电路故障 (逆变电路故障)	短路	0.050 2
	开路	0.054 7
主电路故障 (其他故障)	过载	0.056 7
	过电流	0.054 9

根据式(2)、式(3)，该变频器的可靠性 $R(VFD)=0.560\ 1$ ，变频器的平均故障率 $P(VFD)=0.439\ 9$ 。根据文献[19]，如果部件保养良好，变频器的使用寿命可达15年，一般可达10年。文献[20]提出如果工作环境良好，通常情况下一台变频器使用寿命可以达到8~10年，但若所处的环境极差或误操作变频器，会缩短其使用寿命，甚至可能降至1~3年。因此，本文假设变频器的平均寿命为8年。总故障率可以计算为

$$\lambda = \left| \frac{L_n R(VFD)}{T} \right| \quad (4)$$

通过式(4)得到总失效率为0.072 5。平均无故障时间与变频器寿命相关，设备寿命 T （即设备从投运到发生故障的时间）是一个非负的随机变量，平均无故障时间就是其数学期望 $E(T)$ ，如果寿命 T 服从指数分布，则有

$$E(T) = \frac{1}{\lambda} \quad (5)$$

平均无故障工作时间 T （无故障）为

$$T(\text{无故障}) = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.072\ 5} = 13.79(\text{年}) \quad (6)$$

因此，该变频器运行13年以上就会大大增加故障的概率，应注重维修。同时，将底事件概率重要度 (I_n) 和关键重要度 (I_n^c) 引入到变频器可靠性分析中^[21]，计算方法为

$$I_n = \frac{\partial P(VFD)}{\partial p(n)} \quad (7)$$

$$I_n^c = \lim_{\Delta p(n) \rightarrow 0} \frac{\Delta P(VFD) / P(VFD)}{\Delta p(n) / p(n)} = \frac{p(n)}{P(VFD)} I_n \quad (8)$$

在计算变频器可靠性时，可在总体检修年限的基础上，根据式(7)和式(8)求取各部件的重要度。进而确定顶事件故障概率的变化率受每个底事件的影响程度，基于关键重要度按序排列每个底事件，结合各底事件故障率，针对风电机电

组不同的变频器部件合理制订不同检修计划。例如,分析过程中发现整流电路的重要度较高,则可根据式(1)~式(6)计算整流电路的检修周期,从而实现重点检修,使检修效率最大化。制订基于变频器可靠度的检修计划,如图11所示,避免因部件问题造成风电机组性能损坏甚至严重时造成停机的后果。

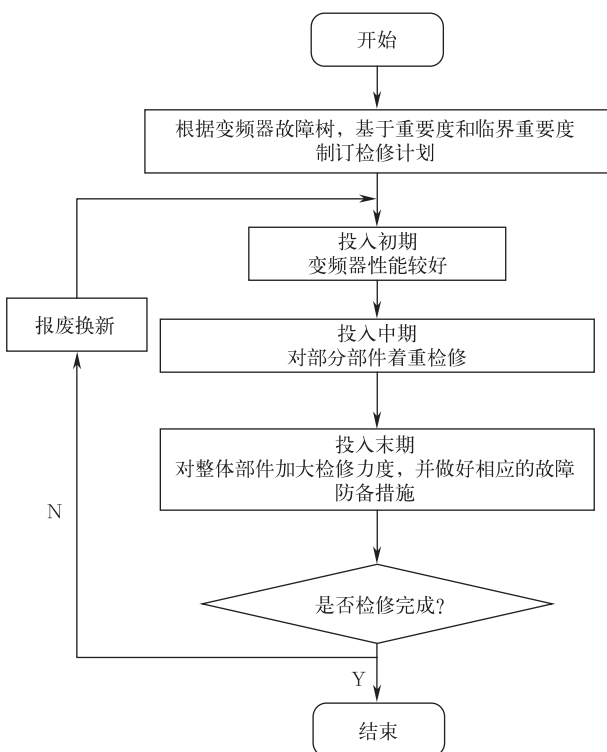


图 11 基于变频器可靠度的检修计划

Fig. 11 Repair schedule based on frequency converter reliability

因此,引入故障树分析法对风电机组变频器进行可靠性分析十分重要,为变频器检修计划的制订与安排提供了依据与方法。

3.2 基于T-S模糊故障树分析法

一般情况下,变频器故障率低,故障行为复杂,难以收集足够的数据进行分析。此外,由于工作人员误操作、气候变化和故障的随机性,变频器故障难以准确记录。面对这种情况,T-S模糊故障树将故障多态性引入到传统的故障树中,并与研究可靠有效方法的模糊集理论相结合,使变频器故障设计和分析变得容易,关于研究T-S模糊故障树的步骤如图12所示^[22]。

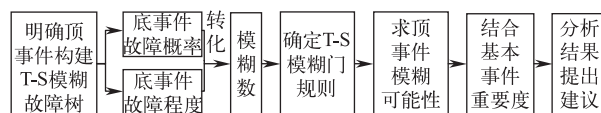


图 12 研究 T-S 模糊故障树步骤

Fig. 12 T-S fuzzy fault tree analysis steps

用模糊数描述各个故障程度,其隶属函数用四边形隶属函数描述^[23],如图13所示。

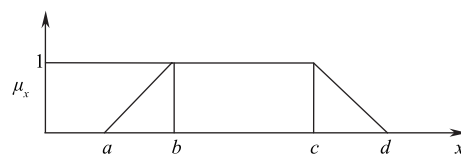


图 13 模糊数的隶属函数

Fig. 13 Membership function of fuzzy numbers

在T-S模型中,上下级之间逻辑关系经T-S门处理。介绍如下^[24]:如果 $x_n (n=1,2,\dots,i)$ 为输入基本事件的变量, $y_j (j=1,2,\dots,m)$ 为与之相应的中间事件变量, T 为最终输出量(即顶事件变量),以上各类事件相应的不同故障状态分别表示为模糊数 $x_n^{a_n} (a_n=1,2,\dots,k_i)$, $y_j^{b_j} (b_j=1,2,\dots,o_j)$ 和 $T_q (q=1,2,\dots,r)$,其中, $0 \leq x_1^1 < x_1^2 < \dots < x_1^{a_1} \leq 1, \dots, 0 \leq x_n^1 < x_n^2 < \dots < x_n^{a_n} \leq 1; 0 \leq y_j^1 < y_j^2 < \dots < y_j^{b_j} \leq 1$ 。T-S门规 $s (s=1,2,\dots,r)$ 可表示为:如果输入基本事件 x_1 的故障状态为 $x_1^{a_1}, \dots$,事件 x_n 的故障状态为 $x_n^{a_n}$;则中间事件 y_j 的故障状态 $y_j^{b_j}$ 的模糊可能性为 $P^s(y_j^{b_j})$,其中 $a_1=1,2,\dots,k_1; a_n=1,2,\dots,k_n$ 。 r 为中间事件的规则总数,满足

$$r = k_1 k_2 \cdots k_n = \prod_{i=1}^n k_i \quad (9)$$

对于各个基本事件,其各种故障的模糊可能性分别用 $p(x_1^{a_1}), \dots, p(x_n^{a_n})$ 表示,规则 s 的执行可能性为

$$p_o^s = p(x_1^{a_1}) p(x_2^{a_2}) \cdots p(x_n^{a_n}) \quad (10)$$

事件 y 的模糊可能性为

$$\begin{cases} p(y^1) = \sum_{s=1}^r p_o^s p^s(y^1) \\ p(y^2) = \sum_{s=1}^r p_o^s p^s(y^2) \\ \vdots \\ p(y^{b_j}) = \sum_{s=1}^r p_o^s p^s(y^{b_j}) \end{cases} \quad (11)$$

如果已知基本事件 $x_n(n=1,2,\dots,i)$ 的故障状态为 $x'_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, 则估量上级事件的各种故障程度模糊可能性为

$$\begin{cases} p(y^1) = \sum_{s=1}^r \beta_s^*(x') p^s(y^1) \\ p(y^2) = \sum_{s=1}^r \beta_s^*(x') p^s(y^2) \\ \vdots \\ p(y^{b_j}) = \sum_{s=1}^r \beta_s^*(x') p^s(y^{b_j}) \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta_s^*(x') = \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^s}(x'_j) / \sum_{s=1}^r \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^s}(x'_j) \quad (13)$$

式中, $\mu_{x_j^s}(x'_j)$ 表示在第 s 条规则下, 第 j 个器件的故障程度 x'_j 所相应的模糊集的隶属度。

在T-S模型中, 如果底事件的模糊可能性已知, 则可根据这一条件结合式(10)、式(11)得出顶事件的模糊可能性; 如果底事件的故障程度已知, 则可根据这一条件结合式(12)、式(13)求解出顶事件不同故障程度的模糊可能性^[25]。在某些情况下, 如果中间事件或底事件故障已知, 但其故障状态是未知的, 则系统的性能可靠性可通过考虑一个平均可能性来进行求解^[26]。除此之外, 通过获取T-S重要度的方式, 能够得到影响故障的一些关键部件^[27]。针对变频器来说, T-S模糊模型可以在变频器故障发生前起到预防作用, 并作为其制订检修计划的依据之一。当变频器出现故障时, 首先选择T-S模糊重要度大的部件进行检查, 从而提高变频器的检修效率和可靠性。

下面构建变频器T-S模糊故障树, 如图14所示。

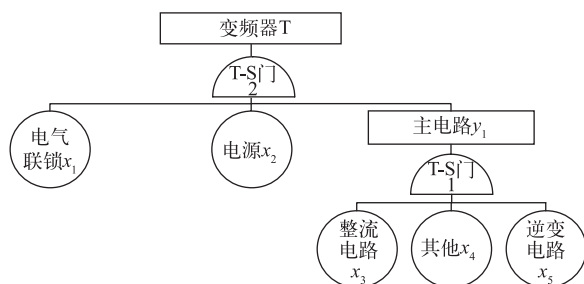


图14 变频器T-S模糊故障树

Fig. 14 Frequency converter T-S fuzzy fault tree

图14中, 包含两个T-S模糊门, T 为顶事件, y_1 为中间事件, $x_1, x_2, \dots, x_5$ 为基本事件。假设 x_2 常见故障程度存在(0,1)两种状态, 假设 x_1, x_3, x_4, x_5, y_1 的常见故障程度存在三种状态, 即(0,0.5,1), 选取隶属函数。T-S模糊门规则见表4和表5。

表4 T-S模糊门1

Tab. 4 T-S Fuzzy Gate 1

序号	x_3	x_4	x_5	0	y_1 0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.1	0.6	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.2	0.5	0.3
5	0	0.5	0.5	0.1	0.5	0.4
6	0	0.5	1	0	0	1
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0.5	0	0	1
9	0	1	1	0	0	1
			$\vdots$			
27	1	1	1	0	0	1

表5 T-S模糊门2

Tab. 5 T-S Fuzzy Gate 2

序号	x_1	x_2	y_1	0	T 0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.1	0.4	0.5
3	0	0	1	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1
5	0	1	0.5	0	0	1
6	0	1	1	0	0	1
7	0.5	0	0	0.3	0.5	0.2
8	0.5	0	0.5	0.1	0.3	0.6
9	0.5	0	1	0	0	1
10	0.5	1	0	0	0	1
			$\vdots$			
18	1	1	1	0	0	1

本文假设各底事件 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 的故障率($10^{-6}/h$)分别是5.8、15.6、5.6、6.2和5.8(故障程度为1时的模糊可能性)。如果 x_1, x_3, x_4, x_5 的故障程度为1的概率与为0.5的概率相同, 则可根据表4和表5, 通过式(10)和式(11)得到 T 模糊可能性为

$$P(T=0.5) = \sum_{s=1}^{18} p_0^s p^s(T=0.5) = 6.88 \times 10^{-6}$$

$$P(T=1) = \sum_{s=1}^{18} p_0^s p^s(T=1) = 50.41 \times 10^{-6} \quad (14)$$

综上所述, 将T-S模糊故障树分析方法引入到变频器的可靠性分析中, 解决了变频器故障概率和故障机理的不确定性问题。在变频器可靠性分析过程中, 引入故障程度的概念, 使可靠性分析结果更符合实际情况。通过引入模糊逻辑的概念, 降低了建立变频器故障树的难度, 扩大了故障树在变频器可靠性分析中的应用范围。

4 结束语

本文针对风电机组变频器, 对故障进行分析与仿真, 分级分析变频器故障, 将基于故障树和T-S模糊故障树的可靠性分析方法引入变频器。由变频器故障树结合可靠性分析理论得出变频器的可靠性指标结果和变频器检修周期, 同时, 根据变频器各部件的不同失效率和重要度, 制订出变频器的合理检修计划。当变频器历史数据采集不足时, 引入模糊数的概念, 根据T-S模糊故障树计算变频器整体多状态故障的模糊可能性, 弥补了传统故障树的一些不足, 为变频器的可靠性分析提供了新的依据, 对风电机组的稳定运行具有重要意义。

参考文献

- [1] KIILUNEN J, FRISK L. Reliability testing of frequency converters with salt spray and temperature humidity tests[C]. 2009 European Microelectronics and Packaging Conference, 2009: 1-5.
- [2] ZHANG Sheng, CHENG Zhengyong, LI Ying, et al. The development of dynamic systems fault diagnosis technology[P]. Proceedings of the 2015 International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference, 2015.
- [3] 苗伟. 智能故障诊断及其在变频器中的应用研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2009.
- [4] 邓云晖, 丁志, 刘映帆. 利用信息化系统诊断高压变频器疑难故障[C]. 第五届全国石油和化工电气技术大会论文集, 2020: 216-220.
- [5] 赵毅斌. 基于因子分析的变频器故障诊断[J]. 电气应用, 2011, 30(11): 72-74.
- [6] 张芸芸. 基于紧致型小波神经网络的六脉波变频器故障诊断研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [7] 应俊. 基于SVM和遗传算法的变频器故障诊断研究[J]. 微电子学, 2008, 38(6): 787-790, 795.
- [8] 高崑. 基于RBD方法的船用变频器可靠性计算[J]. 船电技术, 2015, 35(4): 6-8.
- [9] 赵曙伟. 国产高压变频器在百万机组的运行可靠性研究[J]. 电气传动, 2014, 44(12): 70-72, 89.
- [10] 曾允文. 变频器的故障诊断与处理[J]. 电气开关, 1994(3): 22-28.
- [11] 戴毅, 胡立锦, 张新燕. 小波包分析和神经网络在风电机组变频器故障诊断中的应用[J]. 电力与能源, 2012, 33(2): 155-158.
- [12] 赵海龙. 基于Matlab故障仿真的变频器主电路故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- [13] 范伶俐, 蔡琴. Simulink环境下的三相桥式整流电路仿真[J]. 电子制作, 2015(19): 67-69.
- [14] 张涛, 刘玲, 张新燕, 等. 基于神经网络的风力发电机变频器故障诊断研究[J]. 华东电力, 2013, 41(6): 1161-1165.
- [15] 孙潘潘. 基于故障树的煤矿设备故障分析方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [16] 孙逊. 基于FTA的故障诊断分析算法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [17] 孙丰涛, 张承慧, 崔纳新, 等. 变频器故障诊断技术研究与分析[J]. 电机与控制学报, 2005(3): 73-75, 80.
- [18] 高千. 基于故障树与电气试验的变压器可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [19] 袁晓青. 富士变频器的使用寿命与运行维护[J]. 鞍钢技术, 1994(9): 49-51.
- [20] 杨玲. 浅谈优化变频器工作条件及延长其使用寿命的方法[A]. 中国电工技术学会. 第九届全国

- 电技术节能学术会议论文集[C]. 中国电工技术学会: 中国电工技术学会, 2007: 119-121.
- [21] 张明军, 赵丽, 侯景华, 等. 故障树分析法在机载卫通站故障诊断中的应用[J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 803-808.
- [22] 徐廷学, 王凤芹, 李志强. 基于T-S模糊故障树方法的惯性导航系统可靠性评估[J]. 测控技术, 2022, 41(2): 49-56.
- [23] 辛江涛, 王国华, 范宝庆. 基于T-S模糊故障树的系统故障诊断研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(5): 156-159.
- [24] 李兴运, 齐金平. 基于T-S模糊故障树的受电弓系统可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 33-38.
- [25] 姚成玉, 赵静一. 基于T-S模型的液压系统模糊故障树分析方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(16): 1913-1917.
- [26] 孙利娜, 黄宁, 仵伟强, 等. 基于T-S模糊故障树的多态系统性能可靠性[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 191-198.
- [27] 李翠玉, 孙信民, 蒋旭, 等. 基于T-S模糊故障树的家用空调可靠性分析[J]. 机械设计, 2021, 38(2): 120-126.

作者简介

刘姝(1973—), 女, 博士, 副教授, 研究生导师, 研究方向为分布式发电与微电网技术、多能源系统研究。

王鹤岩(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与微电网技术, 电力设备监测与故障。

(收稿日期: 2022-04-02)