

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210118

模块化多电平换流器功率模块故障鲁棒检测

莫跃¹, 刘思远¹, 李泽滔², 刘明², 姚传涛¹

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400;

2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 介绍了一种模块化多电平换流器功率模块的故障鲁棒检测方法。针对功率模块模型的不确定性, 建立了故障检测的自适应阈值区间。分析了功率模块动态特性的等张性, 利用顶点算法构造了不同不确定因素的响应轨迹区间, 用所有不确定因素的响应轨迹曲线的上下外包络线形成故障检测的自适应阈值区间。该方法对所考虑的不确定因素具有鲁棒性, 而对故障保持了敏感性, 能有效降低故障检测的误报率和漏报率。仿真实验验证了该方法的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 功率模块; 故障鲁棒检测; 自适应阈值; 等张性

Robust fault detection of a power module in a modular multilevel converter

MO Yue¹, LIU Siyuan¹, LI Zetao², LIU Ming², YAO Chuantao¹

(1. Tianshengqiao Branch of Extra High Voltage Power Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd., Xingyi 562400, China; 2. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: This paper introduces a robust fault detection method for a modular multilevel converter power module. Taking into account the uncertainties of the power module model, the adaptive threshold interval of fault detection is established. The isotonicity of the power module dynamic is analyzed, and the response trajectory intervals of different uncertain factors are constructed by using a vertex algorithm. The adaptive threshold interval of fault detection is built by using the upper and lower outer envelopes of the response trajectory family of all uncertain factors. The proposed method is robust to the considered uncertainties and sensitive to faults. This can effectively reduce the false alarm rate and missing alarm rate of fault detection. Simulation results show the effectiveness of the method.

This work is supported by the Project of Extra High Voltage Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. CGYKJXM20180354) "Research on Fault Diagnosis Technology of Flexible DC Power Module in Luxi Station".

Key words: modular multilevel converter; power module; robust fault detection; adaptive threshold; isotonicity

0 引言

随着电力系统复杂性不断增大, 发生故障的因素不断增多, 有关电力系统故障诊断及处理方法的研究日益受到重视^[1-3]。模块化多电平换流器(MMC)技术近年来发展很快, 在超高压柔性直流输电^[4]、直流柔性配网^[5]等重点工程得到了广泛应用, 保证MMC稳定可靠运行的故障诊断技术因此受到了越

来越多的关注^[6-8]。MMC在结构上由众多结构相同的功率子模块(下称功率模块)组合而成, 功率模块故障诊断技术的研究具有重要的工程意义。

功率模块由于制造过程中元器件性能存在偏差, 运行过程中各功率模块的工位差异, 各功率模块服役年限差异引起的器件衰老过程不一致等, 这些因素都导致现场每个功率模块之间以及实际功率模块与功率模块标称模型之间在特性上存在差异, 即存在模型的不确定性。同时, 现场功率模块用于故障诊断的信号会受到各种干扰信号的污染, 即存在测量的不确定性。在被监测对象存在模型不确定和测量不确定性因素时, 往往会导致故障检测的误

基金项目: 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司项目资助(CGYKJXM20180354)“鲁西站柔直功率模块故障诊断技术研究”

报率和漏报率上升。因此, 如何克服不确定性对故障检测的影响, 提高故障检测对不确定性的鲁棒性, 是功率模块故障诊断的重要问题。

关于功率模块的故障诊断, 近年来有了一些研究, 但大都是针对功率模块开路故障诊断问题的研究^[9-10], 尚未见到克服不确定性影响、提高功率模块故障检测鲁棒性的研究成果。

本文在分析了功率模块特性的基础上, 采用不确定因素集合的响应轨迹族的上下外包络线构造故障检测报警的自适应阈值, 形成功率模块故障鲁棒检测方法。该方法能够消除不确定因素对故障报警的干扰, 降低误报率, 同时保持对故障的敏感性, 降低故障报警的漏报率。仿真实验验证了该方法的有效性。

1 功率模块及其模型

1.1 MMC 及其功率模块简介

MMC 结构如图 1 所示。共三相, 每相由上桥臂和下桥臂构成。每个桥臂由若干结构相同的功率模块串联构成。每相上桥臂的上端接直流电压侧的正极、下桥臂的下端接直流电压侧的负极。上桥臂的下端与下桥臂的上端相连, 连接点同时接到交流电压侧的线电压端。功率模块如图 2 所示。主要由上 IGBT S_1 、下 IGBT S_2 、电容器 C 以及续流二极管 D_1 、 D_2 构成。功率模块在接入桥臂时端电压为其内部电容器 C 的电容电压, 旁路出桥臂时端电压

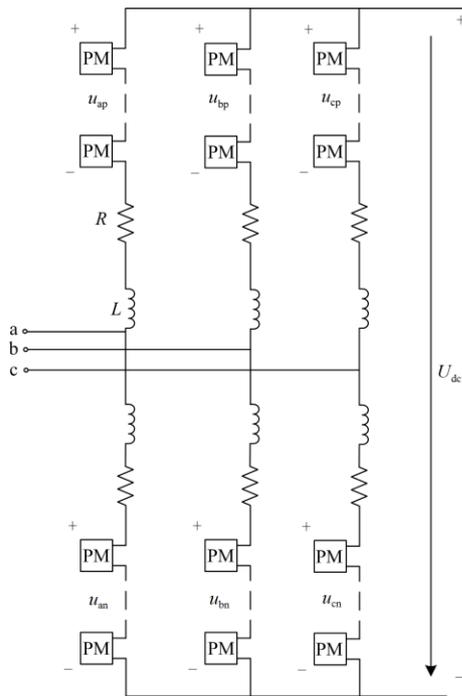


图 1 模块化多电平换流器结构图

Fig. 1 Topology of MMC

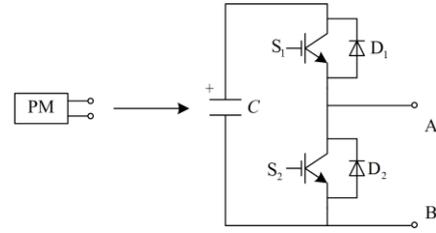


图 2 功率模块主电路原理图

Fig. 2 Main circuit of power module

为 0。MMC 的功能是进行交流侧电压与直流侧电压的相互转换。MMC 的交/直流互换功能的实现依靠电压调制算法的控制。电压调制算法通过控制每个 IGBT 的导通和关断, 按照一定的规律将桥臂的不同功率模块分时接入桥臂或者旁路出桥臂电路, 使桥臂上接入的功率模块的串联电压呈现正弦波形, 而在此过程中桥臂电流不断对功率模块电容器充电, 维持电容器电压的稳定。

1.2 功率模块数学模型

对于一个特定的功率模块, 电容器是唯一的储能元件, 其动态方程为

$$\begin{cases} \dot{u}_c = \frac{1}{c} i_c \\ y_{u_c} = k u_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: c 为功率模块电容器的电容值; u_c 为电容器电压; i_c 为电容器充放电电流。

$$i_c = \frac{(i + |i|)}{2} (1 - B_{S_2}(t)) + \frac{(i - |i|)}{2} B_{S_1}(t) \quad (2)$$

式中: i 为桥臂电流; $B_{S_1}(t)$ 表示电压调制算法对上 IGBT S_1 的控制作用, “0” 表示关断, “1” 表示接通; $B_{S_2}(t)$ 表示电压调制算法对下 IGBT S_2 的控制作用, “0” 表示关断, “1” 表示接通; 系数 $(i + |i|)/2$ 标注桥臂电流正半周电容器的充电回路; 系数 $(i - |i|)/2$ 标注桥臂电流负半周电容器的放电回路。

$B_{S_1}(t)$ 、 $B_{S_2}(t)$ 将桥臂电流 i 调制为电容器充放电电流 i_c 。

由式(1)、式(2)得到

$$\begin{cases} \dot{u}_c = \frac{1}{2c} ((i + |i|)(1 - B_{S_2}(t)) + (i - |i|) B_{S_1}(t)) \\ y_{u_c} = k u_c \end{cases} \quad (3)$$

2 故障检测自适应阈值

2.1 故障检测原理

故障诊断包括故障检测、故障隔离和故障辨识。故障检测负责判断系统是否存在故障。故障隔离负责确定故障位置或故障原因。故障辨识负责评估故

障程度。本文讨论功率模块的故障检测问题。

故障检测主要原理是一致性检验原理。早期的故障诊断采用硬件冗余方式,对可能会发生故障的功能部件,配置一个与之完全相同的硬件部件,称冗余部件。冗余部件与实际功能部件接受完全相同的输入激励信号。如果实际功能部件没有故障,则其输出信号与冗余部件的输出信号将完全相同。冗余部件与实际功能部件输出之差称残差,如果残差为零,则被监测功能部件无故障,如果残差不为零,则实际功能部件存在故障。

为了降低配制硬件冗余部件引起的投资成本,利用软件冗余模型来取代实体的硬件冗余部件,形成解析冗余方法^[11]。

对于功率模块,有故障检测软件冗余模型如式(4)。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{u}}_c = \frac{1}{2c^0} ((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ \tilde{y}_{u_c} = k^0 \tilde{u}_c \end{cases} \quad (4)$$

式中: c^0 为功率模块电容器的电容标称值; $k^0=1$,为功率模块电容器电压传感器增益标称值。在不存在模型不确定性情况下, $c=c^0$, $k=k^0$; $1/2((i+|i|)(1-B_{S2}(t))+(i-|i|)B_{S1}(t))$ 是与实际功率模块相同的输入激励项。

功率模块用于故障检测的残差为

$$\varepsilon = \tilde{y}_{u_c} - y_{u_c} \quad (5)$$

用式(4)作为冗余模型必须要求 \tilde{u}_c 与 u_c 具有相同的初始值,才能保证无故障情况下式(5)的残差 ε 为零。同时模型的扰动也会破坏非故障情况下残差 ε 的零值性。为了消除初始状态的影响,降低系统扰动的影响,式(4)的软件冗余模型采用观测器代替。

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}}_c = \frac{1}{2c^0} ((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) - k_x (\hat{y}_{u_c} - y_{u_c}) \\ \hat{y}_{u_c} = k^0 \hat{u}_c, \quad e = \hat{y}_{u_c} - y_{u_c} \end{cases} \quad (6)$$

观测器残差 e 用于故障检测。

2.2 故障检测阈值

实际系统总存在模型不确定性和测量不确定性。因此,在非故障情况下 e 不可能绝对为零。故障检测实现的办法是采用阈值判断:

$$\begin{cases} \text{if: } e^- \leq e \leq e^+ \\ \text{then: no fault} \\ \text{otherwise: fault} \end{cases} \quad (7)$$

这里 $[e^-, e^+]$ 为阈值区间。

2.3 基于参数区间包络线的自适应阈值

工程上特定的不确定性幅度下,不确定性引起的输出动态轨迹与标称模型的输出动态轨迹之差往往并不是一个定常值,而是随时间变化的动态曲线。采用固定宽度的阈值区间,难以获得满意的故障报警效果。如果阈值区间过大,则可能会引起故障的漏报,如果阈值区间过小,则可能会引起故障的误报。解决的思路是,阈值区间的上下边界随不确定性因素的动态响应轨迹而变化,也就是说,要适应不确定性因素的动态幅度。这样得到的阈值称自适应阈值。利用自适应阈值进行故障检测,才能在存在模型不确定情况下减小故障的漏报率和误报率,实现故障鲁棒检测^[12]。

动态系统故障鲁棒检测是故障诊断领域的重要问题。有区间算法^[12-14]、区域成员算法^[15-16]、Lyapunov函数法^[17]等方法。但大多数方法都计算量大,不适合MMC这样的快速实时系统的在线故障检测。相对而言,参数区间法的顶点算法计算量小^[12-13],功率模块的动态特性又满足顶点算法的使用条件,本文考虑采用这类方法。

模型不确定性常被描述为模型参数的不确定性范围^[12],以求取针对模型不确定性因素的故障检测自适应阈值。对于测量不确定性问题,将测量不确定性因素的最大实时范围建模为系统模型的输入项,则可以采用类似于模型不确定性的思路来处理。本文不再继续讨论该问题。

考虑一般动态系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \theta^x, u) \\ y = C(\theta^y)x \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = [\theta^x, \theta^y] \quad (9)$$

式中: $q \hat{R}^p$ 为系统参数; $x \hat{R}^n$ 为系统状态变量; $u \hat{R}^m$ 为系统输入; $y \hat{R}^r$ 为系统输出。

自适应阈值具体实现思路为:假定参数 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_p$ 的不确定性区间分别为: $q_1 \hat{R} [q_1^-, q_1^+]$, $q_2 \hat{R} [q_2^-, q_2^+]$, \dots , $q_i \hat{R} [q_i^-, q_i^+]$, \dots , $q_p \hat{R} [q_p^-, q_p^+]$, $i=1, L, p$,以 q_i^- 代替 q_i 得到的残差为 $e_{\theta_i}^-$,以 q_i^+ 代替 q_i 得到的残差为 $e_{\theta_i}^+$,则针对不确定性区间 $q_1 \hat{R} [q_1^-, q_1^+]$, $q_2 \hat{R} [q_2^-, q_2^+]$, \dots , $q_i \hat{R} [q_i^-, q_i^+]$, \dots , $q_p \hat{R} [q_p^-, q_p^+]$ 共同作用下的自适应阈值区间取为

$$[e_{\Sigma}^-, e_{\Sigma}^+] =$$

$$[\min\{e_{\theta_1}^-, e_{\theta_1}^+, e_{\theta_2}^-, e_{\theta_2}^+, \dots, e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+, \dots, e_{\theta_p}^-, e_{\theta_p}^+\}, \quad (10)$$

$$\max\{e_{\theta_1}^-, e_{\theta_1}^+, e_{\theta_2}^-, e_{\theta_2}^+, \dots, e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+, \dots, e_{\theta_p}^-, e_{\theta_p}^+\}]$$

即, 以所有参数不确定性的边界对应的残差 $\{e_{\theta_1}^-, e_{\theta_1}^+, e_{\theta_2}^-, e_{\theta_2}^+, \dots, e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+, \dots, e_{\theta_p}^-, e_{\theta_p}^+\}$ 的曲线族(family)的上、下外包络线作为自适应阈值曲线的上、下边界。

如果系统模型不满足对参数的单调性特性, 以及对变量的等张性, 则在不确定性区间 $\theta_i \in [\theta_i^-, \theta_i^+]$ 内有可能存在这样的参数点 $\theta_i^* \in [\theta_i^-, \theta_i^+]$, 用 θ_i^* 代替模型中的 θ_i 得到的残差 $e_{\theta_i}^*$ 会跑到阈值区间 $[\min\{e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+\}, \max\{e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+\}]$ 之外, 即 $e_{\theta_i}^* < \min\{e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+\}$ 或者 $e_{\theta_i}^* > \max\{e_{\theta_i}^-, e_{\theta_i}^+\}$ 。这样, 就可能出现 $e_{\theta_i}^* < e_{\Sigma}^-$ 或者 $e_{\theta_i}^* > e_{\Sigma}^+$ 的情况, $[e_{\Sigma}^-, e_{\Sigma}^+]$ 就不是适合的自适应阈值区间了。

定义参数向量 θ 的区间变量为

$$INT(\theta) = [\underline{\theta}, \bar{\theta}] \quad (11)$$

满足: $\underline{\theta} \leq \theta \leq \bar{\theta}$, 即 $\underline{\theta}_i \leq \theta_i \leq \bar{\theta}_i$, $i = 1, 2, \dots, p$ 。

参数区间的系统输出包络线, 是指系统特定初始条件和控制输入下, 系统参数值取参数区间里任意点时, 系统输出所有可能值的最大值的轨迹, 称上包络线, 系统输出所有可能值的最小值的轨迹, 称下包络线。有的文献将上下包络线及上下包络线围成的区域的总体称包络线。

输出包络线的宽度至关重要^[18], 如果它太紧, 则存在属于该参数区间的参数, 系统输出跑出包络线之外, 因此包络线不包括它们的行为, 这样的包络线是不完整的。另一方面, 如果包络线太宽, 则可能存在参数区间内任何点对应的系统输出轨迹都无法到达的区域, 这样的包络线不紧凑。一个完整但不紧凑的包络线是一个超界定的包络线。一个紧凑但不完整的包络线是一个欠界定的包络线。超界定的包络线作为自适应阈值, 可能会引起故障检测的漏报, 而欠界定的包络线作为自适应阈值, 可能会引起故障检测的误报。一个完整而紧凑的包络线, 才是用于故障检测自适应阈值的合理选择。

为了解决欠界定问题, 需要在每个迭代时刻计算状态区间的最大范围, 然后将该范围作为下一步迭代的依据。用于计算模型状态最大范围的著名工具为区间算法 Interval Arithmetic^[19]。区间算法计算的包络线是完整的。但为了保证完整性, 在每次迭代时都会对状态最大范围高估, 高估会引入部分本不在状态区间的伪状态。每一步迭代都引入这样的伪状态, 会使计算结果迅速膨胀, 包络线界定的区

域迅速变宽, 以至于包络线迅速变得不可用。该现象在学术界被称为包裹效应(Wrapping effect)^[18]。但如果系统模型满足等张特性, 则区间算法计算的包络线可以避免包裹效应^[20]。

另外一种直观的思路是顶点算法^[21]。将参数区间的每个顶点, 即区间端点, 比如一维参数区间 $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$, 其顶点为 $\underline{\theta}$ 和 $\bar{\theta}$, 二维参数区间 $[(\underline{\theta}_1, \underline{\theta}_2), (\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2)]$, 其顶点为 $(\underline{\theta}_1, \underline{\theta}_2)$ 、 $(\underline{\theta}_1, \bar{\theta}_2)$ 、 $(\bar{\theta}_1, \underline{\theta}_2)$ 和 $(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2)$ 共 4 个顶点, 作为参数代入系统模型, 这样的模型称为顶点模型。分别计算每个顶点模型的状态轨迹, 并由状态轨迹曲线计算对应的顶点模型输出轨迹, 将所有顶点模型输出轨迹曲线族的外包络线作为参数区间输出的包络线。顶点算法由于用于计算包络线的顶点模型的输出轨迹都对应于参数区间的参数点, 因此得到的包络线不存在过界定问题, 但可能存在欠界定问题。对于一般的系统, 参数区间内可能存在奇异点, 相应的系统模型输出在包络线限制的区域之外, 从而引起包络线的不完整。但是, 如果系统满足等张条件, 即系统雅可比矩阵的非对角元素为非负的, 且模型对参数满足单调性, 则可以解决这个问题^[22]。

对于系统(8), 其雅可比矩阵为

$$J = \left[\frac{\partial[f(x, \theta, u)]}{\partial x} \right] \quad (12)$$

如果系统雅可比矩阵 J 的非对角元素为非负, 则系统是等张的(Isotonic)。单状态变量的标量系统是等张的^[20]。等张性的系统意味着对变量是单调性的系统。即

$$x_i^1(t) \geq x_i^2(t) \quad \text{iff} \quad x_i^1(0) \geq x_i^2(0) \quad (13)$$

这里 $x_i^1(0)$ 、 $x_i^2(0)$ 是状态 x_i 初始值的两种情况。

$x_i^1(t)$ 、 $x_i^2(t)$ 是状态 x_i 在时刻 t 取值的对应于初始状态 $x_i^1(0)$ 、 $x_i^2(0)$ 的两种情况。

如果系统是等张的, 同时 $f(x, \theta^x, u)$ 是 θ^x 的单调函数, $C(\theta^y)$ 是 θ^y 的单调函数, 则可以保证参数区间的包络线按照区间算法或者顶点算法计算的结果无包裹效应且是完整的^[15,20]。

如前所述, 为了克服状态初值和系统扰动的影响, 用 Luenberger-like 观测器

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}, \theta^x, u) - k_x(\hat{y} - y) \\ \hat{y} = C(\theta^y)\hat{x} \\ e = \hat{y} - y \end{cases} \quad (14)$$

代替系统模型(8), 用残差代替系统输出。相应地,

计算的包络线即为参数区间观测器残差包络线。观测器的雅可比矩阵为

$$J_o = \left[\frac{\partial [f(\hat{x}, \theta^x, u)]}{\partial \hat{x}} - k_x C(\theta^y) \right] \quad (15)$$

将观测器看成一个系统，残差看成输出，对于参数区间，上述结论同样成立。即，如果观测器的雅可比矩阵(15)的非对角线上的元素非负，则观测器残差系统是等张的，如果同时 $f(\hat{x}, q^x, u)$ 是 q^x 的单调函数， $C(q^y)$ 是 q^y 的单调函数，采用参数区间顶点算法，能够得到无包裹效应且完整的观测器残差包络线^[12-13]。

2.4 基于残差阈值的故障检测规则

当用观测器残差代替模型的状态轨迹构建包络线，从而构建自适应阈值后，包络线坐标平面的时间横轴即为以实际对象作为模型与实际对象自己形成观测器情况下的残差曲线，因为这时观测器的输出残差为零，实际对象残差曲线即为横轴线。因此，有故障检测判定规则：若实际对象的参数偏移没有超出任何参数不确定性的区间，则顶点观测器残差形成的自适应阈值的上包络线和下包络线在任何时刻均分别位于时间横轴的两侧。一旦某一个瞬间上包络线与下包络线同时位于时间横轴的同侧，则意味着实际对象的参数偏移超出了参数不确定性区间的范围，即对象有故障发生。

对于没有设定不确定性区间的参数，包括描述结构性故障的参数，则认为其参数不确定性区间宽度为零。一旦有偏移，则对象观测器残差曲线即时间横轴将不一直被上下包络线包围，从而表明有故障。

本文的故障检测自适应阈值计算模型的建模流程如图3所示。自适应阈值计算模型的建模在故障检测系统投运前离线完成，而建模好的自适应阈值计算模型用于故障检测系统实时在线故障检测。

3 功率模块故障鲁棒检测器

3.1 功率模块的故障检测自适应阈值

功率模块系统，根据式(3)的动态模型，由于是单状态系统，所以是等张的，考虑具有不确定性的参数为 $[c, k]$ ，则模型对参数是单调的。采用区间算法或者顶点算法都能够得到准确的包络线。为了避免软件冗余模型的状态初始值与系统状态初始值不一致的影响，以及计算误差累积的影响，采用类似于(6)的观测器模型作为自适应阈值的模型。在设计观测器增益时，要避免观测器增益引入变量纠缠项而破坏等张性。

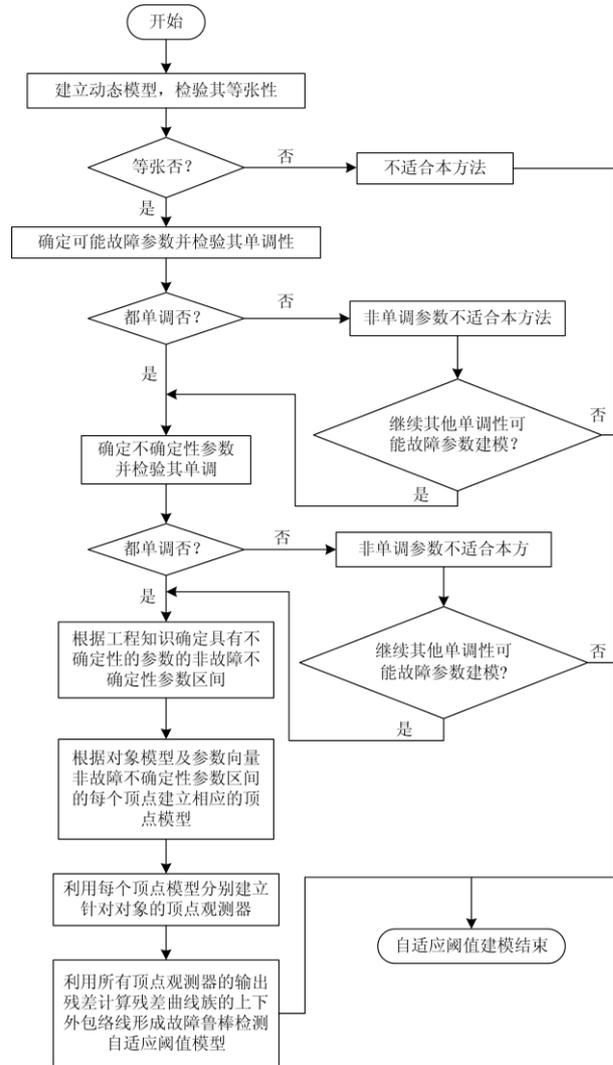


图3 故障检测自适应阈值计算模型建模流程图

Fig. 3 Modeling of adaptive threshold calculation model for fault detection

3.2 功率模块的故障鲁棒检测

考虑功率模块的不确定性因素为

$$c = c^0 \pm c^0 \times 10\%, \quad k = k^0 \pm k^0 \times 3\%$$

其中： $c^0 = 4 \text{ mF}$ 为电容器电容值的标称值； $k^0 = 1$ 为电容器电压传感器增益的标称值。10%、3%是作为示例，根据具体的工程实际，可以选择其他值。

不确定性对应的参数为

$$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [c, k]$$

不确定性的参数区间为

$$INT[\theta] = [\theta, \bar{\theta}] = [(3.6 \text{ mF}, 0.97), (4.4 \text{ mF}, 1.03)]$$

顶点参数为4个顶点：

$$[3.6 \text{ mF}, 0.97], [4.4 \text{ mF}, 0.97], [4.4 \text{ mF}, 1.03], [3.6 \text{ mF}, 1.03]$$

功率模块的标称模型为

$$\begin{cases} \dot{u}_c^0 = \frac{1}{2c^0}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c}^0 = k^0 u_c^0 \end{cases} \quad (16)$$

功率模块的对象模型为

$$\begin{cases} \dot{u}_c = \frac{1}{2c}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c} = k u_c \end{cases} \quad (17)$$

参数区间 4 个顶点模型为

$$\begin{cases} \dot{u}_c^1 = \frac{1}{2 \times (3.6 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c}^1 = 0.97 \times u_c^1 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_c^2 = \frac{1}{2 \times (4.4 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c}^2 = 0.97 \times u_c^2 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_c^3 = \frac{1}{2 \times (4.4 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c}^3 = 1.03 u_c^3 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \dot{u}_c^4 = \frac{1}{2 \times (3.6 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) \\ y_{u_c}^4 = 1.03 u_c^4 \end{cases} \quad (21)$$

4 个顶点模型满足等张特性。分别用这 4 个顶点模型构造顶点观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}}_c^1 = \frac{1}{2 \times (3.6 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) - k_x(\hat{y}_{u_c}^1 - y_{u_c}) \\ \hat{y}_{u_c}^1 = 0.97 \times \hat{u}_c^1, \quad e_c^1 = \hat{y}_{u_c}^1 - y_{u_c} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}}_c^2 = \frac{1}{2 \times (4.4 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) - k_x(\hat{y}_{u_c}^2 - y_{u_c}) \\ \hat{y}_{u_c}^2 = 0.97 \hat{u}_c^2, \quad e_c^2 = \hat{y}_{u_c}^2 - y_{u_c} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}}_c^3 = \frac{1}{2 \times (4.4 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) - k_x(\hat{y}_{u_c}^3 - y_{u_c}) \\ \hat{y}_{u_c}^3 = 1.03 \hat{u}_c^3, \quad e_c^3 = \hat{y}_{u_c}^3 - y_{u_c} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{u}}_c^4 = \frac{1}{2 \times (3.6 \text{ mF})}((i+|i|)(1-B_{S2}(t)) + (i-|i|)B_{S1}(t)) - k_x(\hat{y}_{u_c}^4 - y_{u_c}) \\ \hat{y}_{u_c}^4 = 1.03 \hat{u}_c^4, \quad e_c^4 = \hat{y}_{u_c}^4 - y_{u_c} \end{cases} \quad (25)$$

4 个顶点观测器满足等张特性。由 4 个顶点观测器的 4 个残差实时值(e_c^1 、 e_c^2 、 e_c^3 、 e_c^4)的最大值构造残差上包络线实时值, 4 个残差实时值的最小值构造残差下包络线实时值, 实时值的连接线即为顶点观测器残差的上下包络线。

4 仿真实验

功率模块模型采用式(17), 功率模块对象模型和观测器的激励输入 i 、 $B_{S1}(t)$ 、 $B_{S2}(t)$ 由 MMC 主系统仿真过程提供。

仿真 1: 参数区间用[(3.6 mF, 0.97), (4.4 mF, 1.03)], 将内部的参数点[3.8 mF, 1.02]代入功率模块模型(17), 模拟功率模块实际对象, 计算功率模块输出 y_{u_c} 。利用 y_{u_c} 和 4 个顶点模型观测器(22)–(25)计算残差包络线。图 4 表明, 残差上包络线 e_{\max} 和残差下包络线 e_{\min} 始终分别位于横轴线的两侧, 不会引起误报警。

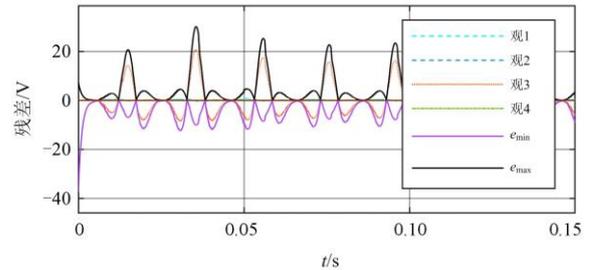


图 4 仿真 1: 对象参数值在参数不确定区间内部
Fig. 4 Result of simulation 1: the parameter value of the power module is in the interior of the parameter uncertainties interval

仿真 2: 参数区间用[(3.6 mF, 0.97), (4.4 mF, 1.03)], 将参数区间外部的参数点[3 mF, 0.5]代入功率模块模型(17)模拟功率模块实际对象, 利用 4 个顶点模型观测器(22)–(25)计算包络线。图 5 表明, 残差上包络线 e_{\max} 和残差下包络线 e_{\min} 很多时刻位于横轴线的同一侧, 表示有故障, 故障检测过程发出故障报警。

仿真 3: 用参数区间[(3.6 mF, 0.97), (4.4 mF, 1.03)], 将临界参数点[4.4 mF, 0.97]代入功率模块模型(17)模拟功率模块实际对象, 利用 4 个顶点模型观测器(22)–(25)计算包络线。图 6 表明, 残差上包

络线 e_{max} 和残差下包络线 e_{min} 中, 同一时刻其中一条线为零时另外一条线一定不为零, 说明临界参数发出故障预警。

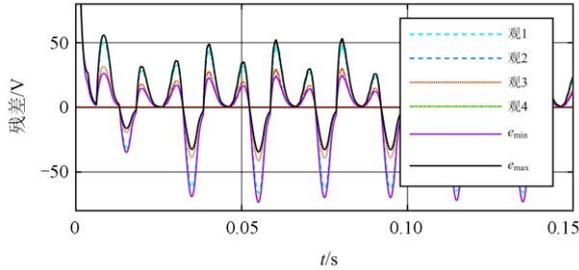


图5 仿真 2: 功率模块电容器电容值衰减为 3 mF, 电压传感器增益变为 0.5

Fig. 5 Result of simulation 2: the capacitance value of the power module capacitor reduces to 3 mF, the gain of the voltage sensor becomes to 0.5

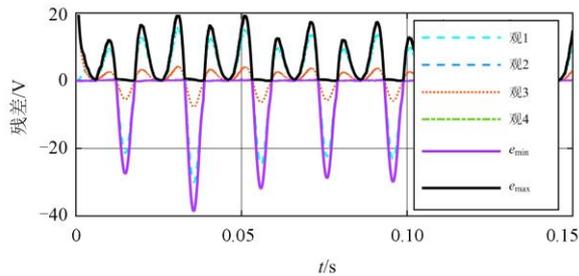


图6 仿真 3: 对象参数值在参数不确定性区间边界
Fig. 6 Result of simulation 3: the parameter value of the power module is on the boundary of the parameter uncertainties interval

仿真 4: 电容器严重受损。电容值 $c = 2 \text{ mF}$, 电压传感器正常, 利用 4 个顶点模型观测器(22)—(25)计算包络线。图 7 表明, 残差上包络线 e_{max} 和残差下包络线 e_{min} 很多时刻位于横轴线的同一侧, 表示有故障, 故障检测过程发出故障报警。

仿真 5: IGBT 故障, 假设在 0.05 s 时刻以后, IGBT S1 不能关断, 其余参数为正常, 仿真结果如图 8 所示。图 8 表明, 在 0.05 s 时刻之前, 残差上包络线 e_{max} 和下包络线 e_{min} 位于横轴线两侧; 而在 0.05 s 时刻之后, 有很多时间段, 残差上包络线 e_{max} 和下包络线 e_{min} 位于横轴线的同一侧, 故障检测过程发出故障报警。

仿真例子表明, 如果功率模块的参数位于参数不确定性区间内部, 且功率模块无故障, 故障检测程序不会发出故障报警。而当功率模块参数的偏离超出了正常的参数不确定性区间, 或者 IGBT 发生

损坏, 比如不能触发导通, 故障检测程序就会发出故障报警, 从而实现了功率模块的故障鲁棒检测。

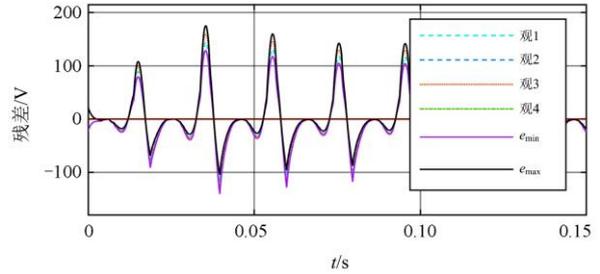


图7 仿真 4: 功率模块电容器电容值衰减为其标称值的 50%

Fig. 7 Result of simulation 4: the capacitance of the power module capacitor reduces to 50% of its nominal value

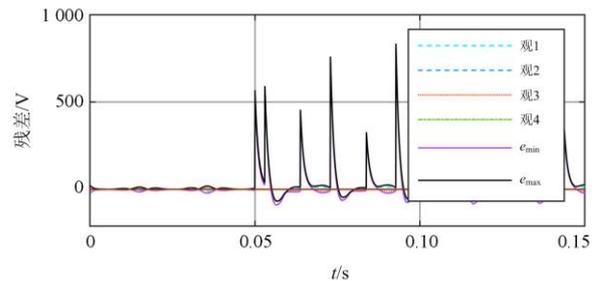


图8 仿真 5: 功率模块 IGBT 故障

Fig. 8 Result of simulation 5: IGBT fault

5 结论

论文讨论了模型不确定性情况下的功率模块鲁棒故障检测问题。以电容器电容值的不确定性和电容电压传感器增益的不确定性为例子, 建立了功率模块故障鲁棒检测器。仿真实验结果验证了本方法的有效性。对其他参数的不确定性, 可以用相同的方法进行处理。下一步工作将根据电力系统工程应用需求, 继续研究本方法在多个参数不确定情况下的故障鲁棒检测问题。

参考文献

[1] 赵冬梅, 王守鹏. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 170-181.
ZHAO Dongmei, WANG Shoupeng. Research review and prospects for power grid fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 170-181.

[2] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit

- breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [3] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [4] 李家羊, 岑韬, 张磊, 等. 提高柔性直流输电换流阀控制系统性能的方法研究[J]. 电气技术, 2017(12): 152-156.
LI Jiayang, CEN Tao, ZHANG Lei, et al. Research on methods of improving the performance of flexible HVDC converter valve control system[J]. Electric Technology, 2017(12): 152-156.
- [5] 李宁, 袁旭峰, 胡晟, 等. 基于 MMC 柔性多端直流配电系统的改进协调控制研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2017, 34(2): 40-45.
LI Ning, YUAN Xufeng, HU Sheng, et al. Research on improved coordinated control based on MMC flexible multi-terminal DC distribution system[J]. Journal of Guizhou University: Natural Science Edition, 2017, 34(2): 40-45.
- [6] 彭涛, 郭贤朝, 吴江一, 等. MMC-HVDC 系统阀区单相接地故障定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 143-149.
PENG Tao, GUO Xiancao, WU Jiangyi, et al. Research on location of single-phase grounding fault in valve side of MMC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 143-149.
- [7] 彭宇锋, 张英敏, 李俊松, 等. 考虑线路电容的 MMC-HVDC 系统直流接地故障电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 63-69.
PENG Yufeng, ZHANG Yingmin, LI Junsong, et al. Calculation method of DC grounding fault current in MMC-HVDC system considering line capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 63-69.
- [8] ZHANG Y, CONG W. An improved single-ended frequency-domain-based fault detection scheme for MMC-HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125.
- [9] 蔡婷婷, 肖岚, 王楚扬, 等. MMC 子模块单管开路故障的新型诊断方法研究[J]. 电力电子技术, 2018, 52(11): 81-84.
CAI Tingting, XIAO Lan, WANG Chuyang, et al. Research on a new diagnosis method of MMC sub-module single tube open circuit fault[J]. Power Electronics Technology, 2018, 52(11): 81-84.
- [10] 荣飞, 朱语博, 周诗嘉, 等. 基于子模块电压分组检测的 MMC 子模块开路故障诊断定位方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 127-133.
RONG Fei, ZHU Yubo, ZHOU Shijia, et al. MMC sub-module open circuit fault diagnosis and location method based on sub-module voltage grouping detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 127-133.
- [11] DING S X. Model based fault diagnosis techniques design schemes, algorithms, and tools[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
- [12] PUIG V, STANCU A, ECOBET T, et al. Passive robust fault detection using interval observers: application to the DAMADICS benchmark problem[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(6): 621-633.
- [13] LI Zetao, DAHHOU B, WANG Z. Multi-parameters fault isolation using vertex algorithm[C] // 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), May 25-27, 2013, Guiyang, China.
- [14] SANCHEZ H, ESCOBET T, PUIG V, et al. Fault diagnosis of an advanced wind turbine benchmark using interval-based ARR and observers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3783-3793.
- [15] WANG Y, PUIG V, XU F, et al. Unknown input observer of discrete-time descriptor systems for state estimation and robust fault detection[J]. IFAC-Papers Online, 2018, 51(24): 307-313.
- [16] SCHWAB S, PUIG V, HOHMANN S. A robust fault detection method using a Zonotopic Kaucher set-membership approach[J]. IFAC-Papers Online, 2018, 51(24): 500-507.
- [17] YIN Y Y, SHI J B, LIU F, et al. Robust fault detection of singular Markov jump systems with partially unknown information[J]. Information Sciences, 2020, 537: 368-379.
- [18] ARMENGO L J, TRAVÉ-MASSUYÉS L, VEHI J, et al. A survey on interval model simulators and their properties related to fault detection[J]. IFAC Proceedings, 1999, 32(2): 7614-7622.
- [19] MOORE R E, KEARFOTT R B, CLOUD J M. Introduction to interval analysis[M]. Siam: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
- [20] NICKEL K. How to fight the wrapping effect[J]. Interval Mathematics, Lecture Notes in Computer Science, 1986, 212: 121-132.
- [21] 戴志辉, 刘雪燕, 何永兴, 等. 基于 CDSM-MMC 的光伏直流接入系统故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 14-22.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, HE Yongxing, et al. Fault analysis of photovoltaic DC access system based on CDSM-MMC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 14-22.

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-04-16

作者简介:

莫跃(1989—), 男, 学士, 工程师, 研究方向为高压直流输电技术; E-mail: 460572217@qq.com

刘思远(1988—), 男, 通信作者, 学士, 工程师, 研究方向为高压直流输电技术; E-mail: lilaoshixiangmu@163.com

李泽滔(1960—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力电子装备与系统。E-mail: gzulzt@163.com

(编辑 魏小丽)