

永磁操作机构储能电容的状态评估与预测

牟龙华, 刘晓明, 张 鑫

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 真空开关永磁机构储能电容的失效诊断是实际应用中未解决的重要问题. 基于永磁机构的工作原理, 分析了其储能电容(电解电容)主要的退化机理与等效模型, 选择等效串联电阻和电容量作为故障特征参数, 提出了基于系统辨识理论的储能电容状态评估方法, 利用最小二乘支持向量机(LS-SVM)算法实现了对等效串联电阻和电容量值的预测, 分析了未来时刻电解电容的状态变化. 仿真实例验证了该评估与预测方法的有效性.

关键词: 永磁操作机构; 储能电容; 参数辨识; 故障预测; 最小二乘支持向量机

中图分类号: TM561

文献标志码: A

Condition Assessment and Prediction of Energy-storage Capacitors Used in Permanent Magnetic Mechanism

MU Longhua, LIU Xiaoming, ZHANG Xin

(College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The failure detection of the energy-storage capacitor is an important issue to be solved in permanent magnetic actuator for vacuum switch. Based on the operating principle of permanent magnetic mechanism, the degradation mechanism of the energy-storage capacitor (electrolytic capacitor) and equivalent circuit model were studied. The equivalent series resistance (R_{ESR}) and capacitance (C) values were selected as feature parameters to identify the faults. An assessment method was proposed by introducing the system identification theory. Furthermore, the least squares support vector machine (LS-SVM) algorithm was used to predict the values of R_{ESR} and C , then the capacitor's condition changes could be obtained and analyzed. The simulation experiments show the effectiveness of this assessment and prediction method.

Key words: permanent magnetic mechanism; energy-storage capacitors; parameter identification; failure prediction; least squares support vector machine

永磁操作机构作为真空断路器广泛应用的驱动元件, 其性能的好坏直接影响着真空断路器的分合闸动态性能^[1], 从而影响到供电、用电系统的安全稳定运行. 利用永磁保持、电子控制的永磁操作机构, 本体可靠性较高, 机械寿命可达 10 万次, 相比之下, 永磁机构控制器的可靠性成为断路器工作性能的关键^[2-3]. 应用情况表明, 永磁机构控制器的电源系统(储能电容器)的状态评估是用户最为关心的问题, 至今仍未得到有效解决. 因此, 实现永磁机构储能电容的失效诊断与预测是十分必要的. 目前, 电解电容器由于其成本低、容量大, 被广泛用作永磁机构的储能部件^[3-4].

国内外对电解电容的研究大多基于电力电子功率变换电路^[5-7], 其开关频率通常为几十或几百千赫兹, 电路中的电解电容起到滤波和电能储存、变换的作用. 文献研究表明, 其电解电容两端存在明显的集中于开关动作时的暂态电压与暂态电流, 且其幅值较大, 经快速傅里叶变换提取可用于故障特征参数(等效串联电阻 R_{ESR})的计算. 然而永磁机构工作于低频环境, 其电解电容的等效串联电阻 R_{ESR} 与电容量 C 难以计算, 从而给其状态监测带来很大困难.

本文在分析永磁机构电解电容的退化机理与等效模型基础上, 提出利用系统辨识理论对模型的传递函数进行“灰箱”参数辨识; 通过辨识结果与特征参数 R_{ESR} 和 C 简单的代数关系, 获得 R_{ESR} 和 C 的值, 从而实现对储能电容的状态评估. 此过程仅利用充电过程的电容电压、电流的采样值作为辨识的输入量, 方法简单可行, 易于实现. 同时, 本文采用 LS-

收稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(51207110); 上海市科学技术委员会资助(12ZR1451300); 上海市教育委员会科研创新项目(11CXY12)

第一作者: 牟龙华(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、电能质量与智能电网.

E-mail: lhmu@tongji.edu.cn

SVM(最小二乘支持向量机)算法对故障参数序列进行了预测,预测结果可用于分析未来时刻电解电容的状态变化.最后,用仿真实例验证了评估方法的可行性和预测方法的有效性.

1 永磁操作机构与控制器

永磁操作机构主要由永久磁铁和分、合闸控制线圈等部件组成,其结构示意图如图 1 所示.

永磁操作机构必须在控制器的驱动下才能实现开关的分合操作^[8-9].永磁机构控制器包含控制单元和分、合闸储能电容两部分.控制单元内含有永磁机构的控制逻辑和分合闸线圈驱动等;而储能电容作为控制器的电源系统,由开关电源为其充电,然后其瞬时放电产生很高的脉冲电流为永磁机构供电,从而保证断路器顺利合、分闸.

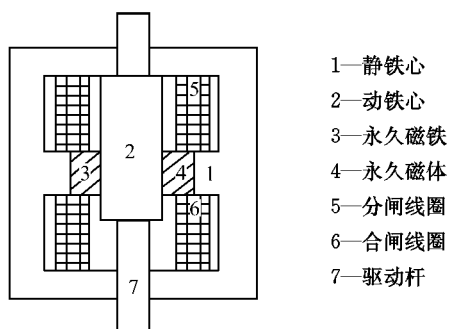


图 1 永磁机构结构图

Fig.1 Structure of permanent magnetic actuator

结合图 1,当合闸信号来到时,储能电容向合闸线圈放电,合闸线圈得电后所产生的磁拉力使动铁心向下运动,最后由永久磁铁将动铁心保持在合闸位置,完成一次合闸动作;当分闸信号来到时,分闸线圈被充电,产生很大的磁拉力使得动铁心向反方向运动,同样由永久磁铁将它保持在分闸位置,完成一次分闸动作.

上述原理表明,储能电容是为永磁机构供电的关键元件,其安全可靠才能保证断路器顺利合、分闸.由于储能电容安装在开关内,而且没有电气指示,运行过程中无法发现储能电容的异常情况,因此需要在线评估储能电容的运行状态.

2 储能电容的失效机理与故障特征参数的选取

工作条件下,电解电容的电极发生着缓慢的蓄电池反应.随着阳极金属氧化膜的不断修复,产生不

平整的表面,导致电介质的介电性能及耐压性能降低;增厚的电介质还会引起电容值 C 下降,等效串联电阻值 R_{ESR} 增大;阴极反应产生的氢气会加速电解液的蒸发^[10].同时,作为永磁机构储能装置的电解电容,其充放电过程中变化的电压在通过电介质时会引起能量损耗,再加上漏电流造成的能量损耗,都会导致电容内部温度升高.高温运行会加速电解液的散失.随着内部电解液的减少, R_{ESR} 将增大, C 将减小^[11-12]; R_{ESR} 增大将增加电解电容的功率损耗,进而升高电容器的内部温度,加速电容性能的退化.因此,长期使用中影响永磁机构储能电容寿命的主要原因是电解液的散失,而温升是加速这一过程的主要因素.

通常,以电解液损失 40% 为判定电解电容失效的标准.由于 R_{ESR} 主要由电解液的电阻组成,且存在如下的近似关系^[13]:

$$R_{\text{ESR}}/R_{\text{ESR}0} = (V_0/V)^2 \quad (1)$$

式中: V 为当前时刻电解液容量; V_0 为初始时刻电解液容量; R_{ESR} 为当前时刻等效串联电阻值; $R_{\text{ESR}0}$ 为初始时刻等效串联电阻值.

于是可得电解电容基于等效串联电阻的寿命标准,即当 R_{ESR} 超过初始值的 3~4 倍时,电解电容失效.此外,文献^[14]表明,当电解电容的电容量 C 减小 20% 时也会导致电容失效.

国内外学者通过实验测量分析,指出实际电容器 R_{ESR} 和 C 随温度、时间变化的模型可用下式表示^[15]:

$$R_{\text{ESR}0} = \alpha + \beta e^{-T/p} \quad (2)$$

$$C_0 = \epsilon + qT \quad (3)$$

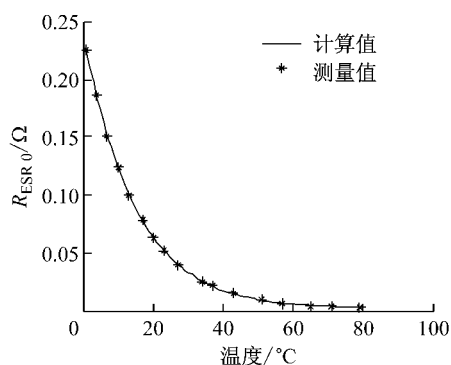
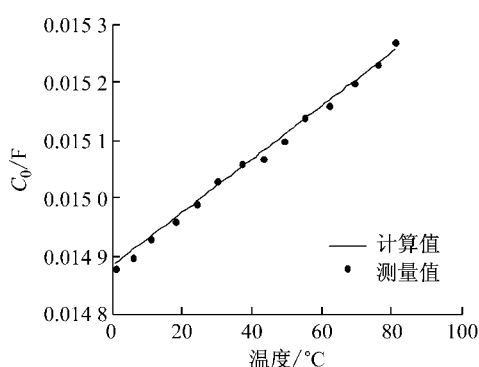
$$R_{\text{ESR}}(t) = (R_{\text{ESR}0} + A)e^{Bt} \quad (4)$$

$$C(t) = EC_0 + Ft \quad (5)$$

式中: $\alpha, \beta, \epsilon, p, q, A, B, E, F$ 是根据电容确定的参数; T 为电容内部核心温度,由环境温度和电容内核的温升组成; $R_{\text{ESR}0}$ 和 C_0 分别为初始时刻的等效串联电阻值和电容值; t 为时间.本文选取文献^[15]中提供的参数,得到 R_{ESR} 和 C 初始值随温度变化的情况分别如图 2 和图 3 所示.

图 2 和图 3 中, R_{ESR} 初始值随温度的升高而逐渐减少,这是由于电解液的电阻率随温度上升而减小造成的; C 初始值随温度的升高而增大,这是由电容的特性决定的.而 R_{ESR} 和 C 值随时间的变化则与其内部物理、化学反应密切相关,直接表现为电解液的损失引起 R_{ESR} 明显增大和 C 明显减小.

综上所述可知, R_{ESR} 和 C 是衡量电解电容性能

图 2 R_{ESR} 随温度的变化Fig. 2 R_{ESR} variations with temperatures图 3 C_0 随温度的变化Fig. 3 C_0 variations with temperatures

最好的特征参数。

3 特征参数的模型与算法

实际电解电容器存在很多非理想特性,可以通过附加寄生元件来表征^[16],如图 4a 所示。 R_{ESR} 为其等效串联电阻, C 为等效串联电容, R_{ESL} 为等效串联电感, R_p 为电容器等效泄漏并联电阻。由于永磁操作机构通常工作在低频条件下, R_p 很小,且 R_{ESL} 与 R_{ESR} 相比也很小,可以忽略 R_p 和 R_{ESL} 的影响,因此简化等效为 C 和 R_{ESR} 的串联,如图 4b 所示。

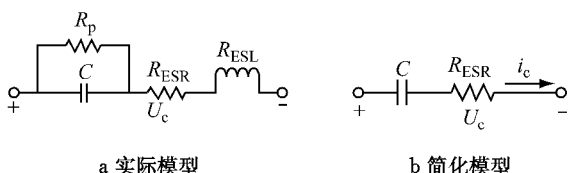


图 4 电解电容等效电路模型

Fig. 4 Equivalent-circuit model of an electrolytic capacitor

R_{ESR} 和 C 的值均无法直接测量,需要选择适当的监测信号经计算后间接得到。由于永磁机构的储能电容在充满电且未接到合分闸信号时处于稳态,

无法反映电容的内部状态,因此选取充电过程中电容电压 u_c 和电容电流 i_c 作为监测信号。图 4b 所示简化模型的传递函数为

$$H(s) = \frac{u_c(s)}{i_c(s)} = \frac{R_{\text{ESR}}Cs + 1}{Cs} \quad (6)$$

采样获得的监测信号为离散信号,不能在 s 域内计算,于是将式(6)经 Tustin 双线性 z 变换转化到离散 z 域内,令

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)进行替换,得到

$$H(z^{-1}) = \frac{\left(R_{\text{ESR}} + \frac{T_s}{2C}\right) + \left(\frac{T_s}{2C} - R_{\text{ESR}}\right)z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

式中: T_s 为采样周期; $b_0 = R_{\text{ESR}} + \frac{T_s}{2C}$; $b_1 = \frac{T_s}{2C} - R_{\text{ESR}}$ 。

由式(8)可知,求出 b_0 和 b_1 便可得到参数 R_{ESR} 和 C 值。

4 故障诊断与预测

4.1 参数辨识特征提取

系统辨识(system identification)是现代控制理论的一个分支。辨识的目的就是根据过程所提供的测量信息,在某种准则意义下,估计出模型的未知参数。系统辨识主要包括模型结构辨识和参数辨识^[17],本文只讨论参数辨识。

经典参数辨识方法主要包括最小二乘法、辅助变量法、极大似然法和时变参数法等^[18]。其中,最小二乘估计可以有效地用于电力系统的状态估计、参数估计以及自适应控制中。

式(8)已给出了电解电容的传递函数模型,即把充电过程中电容电流 i_c 的采样值作为输入量,电容电压 u_c 的采样值作为输出量。该模型属于系统结构已确定,仅需辨识其中系数的“灰箱”系统,式(8)中 b_0 和 b_1 是待辨识的参数,辨识模型如图 5 所示。

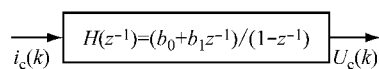


图 5 电解电容“灰箱”模型

Fig. 5 “Grey box” model of an electrolytic capacitor

其差分方程为

$$A(z^{-1})u_c(k) = B(z^{-1})i_c(k) + e(k) \quad (9)$$

式中: $A(z^{-1})=1-z^{-1}$; $B(z^{-1})=b_0+b_1z^{-1}$.

将式(9)展开整理为

$$u_c(k)=u_c(k-1)+b_0i_c(k)+b_1i_c(k-1)+e(k) \quad (10)$$

式中: $u_c(k)$, $u_c(k-1)$ 分别为系统的第 k , $k-1$ 次输出测量值; $i_c(k)$, $i_c(k-1)$ 分别为系统的第 k , $k-1$ 次输入测量值; $e(k)$ 为均值为零时的随机噪声.

将式(10)写成最小二乘格式

$$u_c(k)=h(k)\theta+e(k) \quad (11)$$

式中: $h(k)$ 为样本集合; θ 为被辨识的参数向量.

$$\begin{cases} h(k)=[u_c(k-1), i_c(k), i_c(k-1)] \\ \theta=[1, b_0, b_1]^T \end{cases}$$

采用准则函数

$$J(\theta)=\sum_{k=1}^{\infty}[e(k)]^2=\sum_{k=1}^{\infty}[u_c(k)-h(k)\theta]^2 \quad (12)$$

根据输入输出数据,极小化 $J(\theta)$,求参数 θ 使得 $J(\theta)$ 为最小. 这就是最小二乘辨识问题.

本文利用 Matlab 系统辨识工具箱,采用最小二乘法对参数 b_0 和 b_1 进行辨识. 由于 b_0, b_1 与故障特征参数值(R_{ESR} , C)之间是简单的代数关系

$$\begin{cases} R_{ESR}=(b_0-b_1)/2 \\ C=T_s/(b_0+b_1) \end{cases} \quad (13)$$

因此容易获得 R_{ESR} , C 值,且精度较高,满足故障诊断与预测的要求.

4.2 LS-SVM 回归预测

支持向量机(SVM)作为一种机器学习方法,可以解决小样本、非线性、高维数等问题的回归建模与预测^[19]. 但普通 SVM 计算复杂,运算比较缓慢,而最小二乘支持向量机(LS-SVM)是标准 SVM 的一种拓展,优化指标采用了平方项,并用等式约束代替了不等式约束,即将二次规划问题转化为求解一组线性方程,运算简单,收敛速度快,精度高.

SVM 回归函数表达式为

$$f(x)=w^T\varphi(x)+b \quad (14)$$

式中: $f(x)$ 为预测的输出; $\varphi(\cdot)$ 表示非线性函数; x 为输入; w 为权向量, $w \in R^n$; b 为常数, $b \in R$.

为使式(14)满足结构风险最小化原理,最小二乘支持向量机的优化目标为

$$\min_{w, b, \epsilon_i} J(w, e) = \frac{1}{2}w^2 + \frac{1}{2}M \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (15)$$

$$\text{s. t. } y_i = w^T\varphi(x_i) + b + \epsilon_i \quad (16)$$

式中: ϵ_i 为误差; M 为常数; x_i 为输入训练样本的第 i 个分量; y_i 为输出样本的第 i 个分量.

引入拉格朗日函数 L 得到

$$L = J(w, e) - \sum_{i=1}^n a_i \{w^T\varphi(x_i) + b + \epsilon_i - y_i\} \quad (17)$$

根据 Karush-Kuhn-Tucker 定理,最终得到 LS-SVM 回归函数如下式:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x_i, x) + b \quad (18)$$

式中: a_i 为拉格朗日系数,且根据 Mercer 条件定义核函数; $K(x_i, x_j) = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$.

综上所述,LS-SVM 的训练问题归结为 1 个线性方程组的求解问题,比普通 SVM 求解二次规划要简单快速.

本文利用 LS-SVM 算法分别对 R_{ESR} 和 C 进行回归预测. 取训练样本集分别为 $\{t_i, R_{ESR_i}\}$ 和 $\{t_i, C_i\}$, $i=1, \dots, n$ (n 为样本总数),训练得到输入为时间 t , 输出分别为 R_{ESR} 和 C 值的回归函数

$$R_{ESR}(t) = f(t) = \sum_{i=1}^n a_i K(t_i, t) + b \quad (19)$$

$$C(t) = \tilde{f}(t) = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i K(t_i, t) + \tilde{b} \quad (20)$$

这样,就可以得到 $(t+k)$ 时刻 R_{ESR} 和 C 的预测值为

$$R_{ESR}(t+k) = f(t+k) = \sum_{i=1}^n a_i K(t_i, t+k) + b \quad (21)$$

$$C(t+k) = \tilde{f}(t+k) = \sum_{i=1}^n \tilde{a}_i K(t_i, t+k) + \tilde{b} \quad (22)$$

从而可对未来时刻电解电容的状态变化进行预测.

4.3 故障诊断方法

本文提出的储能电容失效诊断与预测方法如图 6 所示.

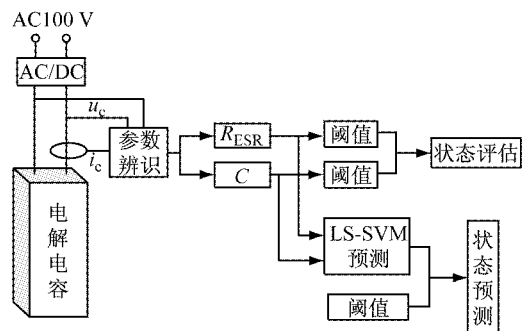


图 6 诊断与预测的总体设计

Fig.6 Overall design of diagnosis and prediction

根据辨识计算得到故障特征参数 R_{ESR} 和 C 值的大小就可获知电容是否失效,电解电容状态评估准则为:① 当 $R_{\text{ESR}} \geq 3R_{\text{ESR}0}$ 且 $C \leq 0.8C_0$, 储能电容完全失效;② 当 $R_{\text{ESR}} \geq 3R_{\text{ESR}0}$ 或 $C \leq 0.8C_0$, 储能电容基本失效;③ 当 $R_{\text{ESR}} < 3R_{\text{ESR}0}$ 且 $C > 0.8C_0$, 储能电容正常。

按照同样的判断准则,借助于 LS-SVM 回归预测结果,获知未来时刻储能电容的状态,从而对失效状态提前预警。

5 仿真实例

5.1 仿真电路与参数设置

图 7 所示为一种永磁操作机构的电气原理图,当手动按下图中合闸按钮 SB1 时,合闸继电器 KM1 线圈得电, KM1 动合触点 KM1-1 闭合,储能电容 C_1 开始向合闸线圈放电;当按下分闸按钮 SB2 时,分闸继电器 KM2 线圈得电,储能电容 C_2 开始向分闸线圈放电。

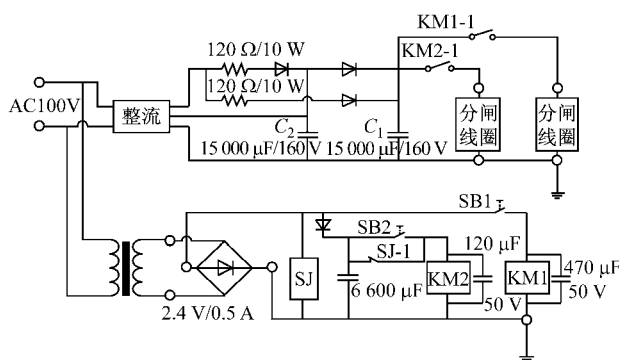


图 7 永磁操作机构电气原理图

Fig. 7 Electrical principle diagram of permanent magnetic actuator

根据永磁机构的实际电气原理图,选择合闸回路,建立的仿真电路及参数设置如图 8 所示。图中, E_a 为整流电势。充电电源由 100 V 交流电压经全桥整流后提供,电路中整流桥后面的二极管在实际应用中用于防止电解电容反向充电,此处的储能电容以 R_{ESR} 和 C 等效,合闸线圈以理想电感和电阻等效。

利用式(2)~(5)建立 R_{ESR} 和 C 随时间变化模型,设温度为 25 °C, $R_{\text{ESR}0} = 0.04 \Omega$, $C_0 = 15000 \mu\text{F}$, 寿命 3 000 h, $R_{\text{ESR}}(3000) = 0.12 \Omega$, $C(3000) = 12000 \mu\text{F}$ 。根据模型,选择从第 2 000 h 开始,每隔 50 h,连续计算 16 组 R_{ESR} 和 C 值,作为仿真电路设置值(可看作实际值)。

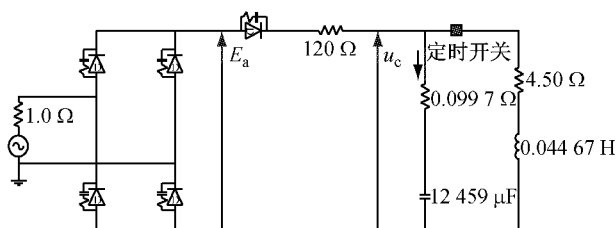


图 8 永磁机构仿真电路

Fig. 8 Simulation circuit of permanent magnetic actuator

本文利用 PSCAD 仿真软件,分别对电容电压 u_c 和电容电流 i_c 进行同步采样,仿真时间为 5 s,采样间隔为 250 μs 。为准确采样储能电容充电过程的数据,本文对采样的起始和终止进行了如下规定:采样时刻的开始是电容电压为某一最低值时对应的时刻,采样的终止是电容电压达到某一最大值时对应的时刻。此区间对应的电容电压最小值与最大值由具体的储能电容器决定。

考虑到实际应用中永磁断路器合、分闸操作后储能电容的能量未完全释放,电容再次充电时其两端电压的最小值不是零;而在充电未达到充电电压时也可能再次放电,因此,就本文仿真实例中的储能电容,选取如图 9 所示的虚线之间 $55 \text{ V} < u_c < 85 \text{ V}$ 的时刻对应的 u_c 与 i_c 进行采样。

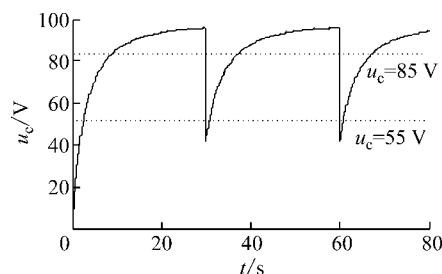


图 9 储能电容充、放电

Fig. 9 Charge/discharge process of an energy-storage capacitor

5.2 辨识结果分析

利用 MATLAB 2012b 的系统辨识工具箱,对电解电容的“灰箱”模型进行参数辨识,将 PSCAD 仿真采样得到的数据 i_c 和 u_c 分别作为辨识的时域数据的输入和输出,辨识模型选择传递函数模式,最后根据辨识出的系数 b_0 和 b_1 由式(13)计算得到 R_{ESR} 和 C 值,具体数据如表 1 所示。由表中数据可知, R_{ESR} 的实际值和计算值的相对误差在 0.6%之内, C 的实际值和计算值的相对误差在 0.01%之内。说明通过“灰箱”参数辨识来获得故障特征参数的方法精度较高,

完全满足故障诊断的要求。

表 1 特征参数实际值与计算值对比表

Tab.1 Comparison between true values and the calculated values of the feature parameters

序列	R_{ESR}			C		
	实际值/ $\text{m}\Omega$	计算值/ $\text{m}\Omega$	误差/ %	实际值/ μF	计算值/ μF	误差/ %
1	55.0	54.82	0.33	13 918	13 918.2	0.001
2	55.3	55.18	0.21	13 832	13 832.2	0.001
3	55.4	55.33	0.13	13 757	13 757.2	0.002
4	55.7	55.73	0.05	13 640	13 640.1	0.001
5	57.3	57.41	0.19	13 539	13 538.9	0.001
6	57.9	58.04	0.24	13 491	13 490.9	0.001
7	59.1	59.32	0.37	13 372	13 371.8	0.002
8	60.3	60.57	0.45	13 297	13 296.8	0.002
9	63.3	63.63	0.52	13 181	13 180.6	0.003
10	67.7	68.06	0.53	13 105	13 104.7	0.002
11	69.3	69.71	0.59	12 931	12 930.6	0.003
12	75.5	75.91	0.54	12 866	12 865.5	0.004
13	81.3	81.70	0.49	12 765	12 764.5	0.004
14	87.0	87.36	0.41	12 641	12 640.5	0.004
15	92.4	92.71	0.34	12 537	12 536.6	0.003
16	99.7	99.95	0.25	12 459	12 458.6	0.003

5.3 预测结果分析

LS-SVM 的主要输入参数包括训练样本、预测样本、核函数 kernel、调整参数 γ 和核参数 ζ 。

本文取表 1 中前 10 个点作为训练样本, 对后 6 个点进行回归预测, 通过大量的仿真实验, 采用径向基核函数; 利用 LS-SVM 工具箱中的参数优化函数 `tunelssvm` 对模型进行自适应优化, 获取 R_{ESR} 的最优参数 $\gamma=8\ 682.6$ 和 $\zeta=6.3$, C 的最优参数 $\gamma_1=984.1$ 和 $\zeta_1=35.5$ 。经预测算法得到 R_{ESR} 和 C 的预测曲线分别如图 10 和图 11 所示, 其中预测值与实际值存在一定误差。经分析, 该误差由两部分组成: 预测样本的误差和预测算法的误差。前者主要是由 u_c, i_c 的监测精度及参数辨识 R_{ESR} 和 C 的准确度决定; 后者则是由 LS-SVM 所建立的模型与实际模型之间的误

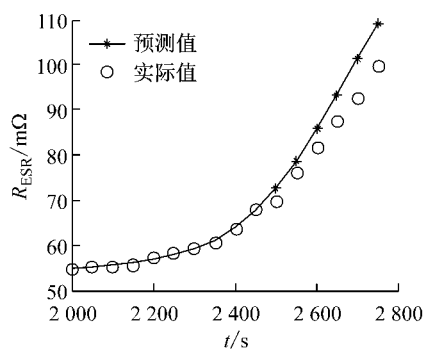


图 10 R_{ESR} 实际曲线与预测曲线

Fig.10 Actual curve and predicted curve of R_{ESR}

差决定的。局限于该预测算法的泛化能力, 预测时间越长, 预测结果与实际值间的误差越大, 因此本方法更适于短期预测。

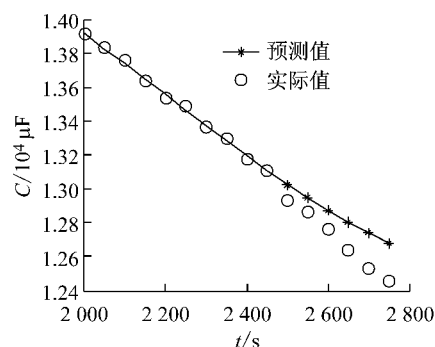


图 11 C 实际曲线与预测曲线

Fig.11 Actual curve and the predicted curve of C

预测的具体数据见表 2 所示, 可知 R_{ESR} 的预测误差在 8% 以内, C 的预测误差在 2% 以内, 精度可满足工程应用要求。

表 2 特征参数实际值与预测值对比表

Tab.2 Comparison between true values and the predicted values of the feature parameters

序列	R_{ESR}			C		
	实际值/ $\text{m}\Omega$	预测值/ $\text{m}\Omega$	误差/ %	实际值/ μF	预测值/ μF	误差/ %
11	69.3	72.53	4.62	12 931	13 022.8	0.71
12	75.5	78.32	3.70	12 866	12 943.2	0.60
13	81.3	84.88	4.42	12 765	12 868.3	0.81
14	87.0	91.91	5.63	12 641	12 798.7	1.25
15	92.4	99.01	7.14	12 537	12 735.0	1.58
16	99.7	105.75	6.02	12 459	12 677.6	1.75

当前时刻储能电容为样本 10 对应的状态, 即: $R_{\text{ESR}}=67.7\ \text{m}\Omega$, $C=13\ 105\ \mu\text{F}$ 。由预测结果可知, 接下来 300 h 内 R_{ESR} 和 C 值均在正常范围内, 即: $R_{\text{ESR}} < 3R_{\text{ESR}0}$ ($120\ \text{m}\Omega$) 且 $C > 0.8C_0$ ($12\ 000\ \mu\text{F}$)。由状态评估准则可知储能电容状态正常。

6 结论

永磁操作机构是真空断路器开关中的核心元件, 其外形结构、动态机理与可靠性等日益成为领域内的热点问题。本文针对实际应用中的具体问题——永磁机构能源系统(储能电容)的可靠性进行了研究。储能电容失效的主要原因是内部电解质的散失, 而升温是加速这一过程的主要因素。本文提出了基于系统辨识理论的储能电容状态评估方法, 通过对储能电容等效模型进行参数辨识来获取故障特

征参数(R_{ESR} 和 C),此方法简单可行,易于实现;同时,利用LS-SVM回归预测算法对未来时刻的电容状态进行了预测。仿真实例验证了评估方法的可行性和预测方法的有效性。本文对永磁机构储能电容失效问题的研究,对实现开关状态检修、确保配电网的安全以及可靠运行具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 方春恩,李伟,杨立峰,等.采用模糊控制和脉冲宽度调制技术的同步真空开关位置伺服控制器设计[J].高电压技术,2012,38(6):1327.
FANG Chunen, LI Wei, YANG Lifeng, et al. Position servo-controller design of synchronous vacuum circuit breaker applying technology of fuzzy control and pulse width modulation [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6):1327.
- [2] 曹文思,郭恒,巩鲁洪,等.真空断路器永磁操作机构控制器保护电路元件参数优化设计[J].电力自动化设备,2011,31(11):83.
CAO Wensi, GUO Heng, GONG Luhong, et al. Parameter optimization of protection circuit for operation controller of permanent magnetic actuator with vacuum circuit breaker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):83.
- [3] 林莘.永磁机构与真空断路器[M].北京:机械工业出版社,2002.
LIN Shen. Permanent magnetic actuator and vacuum circuit breaker[M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- [4] 邵盛楠,黄瑜珑,王静君,等.高压断路器电动机驱动操动机构的研究[J].高电压技术,2008,34(3):555.
SHAO Shengnan, HUANG Yulong, WANG Jingjun, et al. Motor drive mechanism of high-voltage circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3):555.
- [5] 孙凤艳,王友仁,崔江,等.功率变换电路电解电容器故障预测方法研究[J].电子测量与仪器学报,2011,24(1):29.
SUN Fengyan, WANG Youren, CUI Jiang, et al. Research on failure prediction method of electrolytic capacitor used in power conversion circuit[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 24(1):29.
- [6] 卢西伟,刘志刚,王磊,等.基于累积损伤理论的铝电解电容疲劳损伤估算方法[J].电工技术学报,2011,26(4):13.
LU Xiwei, LIU Zhigang, WANG Lei, et al. Estimate approach for fatigue damage of aluminum electrolytic capacitor based on accumulated damage theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4):13.
- [7] Braham A, Lahyani A, Venet P, et al. Recent developments in fault detection and power loss estimation of electrolytic capacitors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(1):33.
- [8] 朱学贵,王毅,罗礼全,等.永磁机构的研究与发展[J].高压电器,2006,42(5):372.
ZHU Xuegui, WANG Yi, LUO Liquan, et al. Research and development of permanent magnetic actuator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(5):372.
- [9] 董恩源,刘翌,邹启涛,等.长行程断路器操动用新型磁力机构[J].高电压技术,2010,36(3):816.
DONG Enyuan, LIU Gang, ZOU Qitao, et al. New type magnetic force actuator (MFA) for long stroke circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3):816.
- [10] 王新龙,车剑飞.铝电解电容器中气体析出过程的研究[J].电子元件与材料,2001,20(4):21.
WANG Xinlong, CHE Jianfei. Investigation on gas evolution of aluminum electrolytic capacitors[J]. Electronic Components & Materials, 2001, 20(4):21.
- [11] Vogelsberger M A, Wiesinger T, Ertl H. Life-cycle monitoring and voltage-managing unit for DC-link electrolytic capacitors in PWM converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2):493.
- [12] Amaral A M R, Cardoso A J M. On-line fault detection of aluminum electrolytic capacitors, in step-down DC-DC converters, using input current and output voltage ripple[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 5(3):315.
- [13] Chen Y M, Chou H W, Lee K Y. Online failure prediction of electrolytic capacitor for LC filter of switching-mode power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1):2134.
- [14] 陈永真,李锦.电容器手册[M].北京:科学出版社,2008.
CHEN Yongzhen, LI Jin. Capacitor handbook [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [15] Abdennadher K, Venet P, Rojat G, et al. A real-time predictive-maintenance system of aluminum electrolytic capacitors used in uninterrupted power supplies [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4):1644.
- [16] Ma H, Wang L. Fault diagnosis and failure prediction of aluminum electrolytic capacitors in power electronic converters [C]//31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2005: 842-847.
- [17] 李言俊,张科.系统辨识理论及应用[M].北京:国防工业出版社,2006.
LI Yanjun, ZHANG Ke. System identification theory and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [18] 梁海泉,谢维达,孙家南,等.超级电容器时变等效电路模型参数辨识与仿真[J].同济大学学报:自然科学版,2012,40(6):949.
LIANG Haiquan, XIE Weida, SUN Jianan, et al. Parameter identification and simulation of time-varying equivalent circuit model of supercapacitor [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012, 40(6):949.
- [19] 王雷,张瑞青,盛伟,等.基于支持向量机的回归预测和异常数据检测[J].中国电机工程学报,2009,29(8):92.
WANG Lei, ZHANG Ruiqing, SHENG Wei, et al. Regression forecast and abnormal data detection based on support vector regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8):92.