

基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容监测方法

涂春鸣¹, 柴 鸣¹, 余雪萍¹, 郭 祺¹, 陈江兴², 肖 标¹, 龙 柳¹

(1. 湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082;

2. 国网江西省电力物资有限公司, 江西 南昌 330046)

摘要:铝电解电容器是电力电子系统中的核心组件,也是最容易失效的电力电子元器件之一,其运行状态直接影响电力电子系统的稳定性。为了及时发现并更换存在问题的铝电解电容器,提出了一种基于铝电解电容器放电规律的等效串联电阻(ESR)和电容的监测方法。通过对铝电解电容器放电过程中的电压曲线实时采样,并结合其放电过程中电压和电流之间的关系式,建立ESR和电容的计算模型。最后,设计一套可以监测铝电解电容器ESR值和电容值变化的系统,并进行实验验证。实验结果表明,该方法可以准确测量铝电解电容器的ESR值和电容值,从而验证了所提方法的可行性。

关键词:铝电解电容器;电容放电曲线;ESR;电容;运行状态评估;监测

中图分类号:TM 536

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202007014

0 引言

相较于其他类型的电容器(薄膜电容器和陶瓷电容器等),铝电解电容器具有耐压高、容量大、成本低等诸多优点,其在不间断电源、风力发电系统和光伏发电系统的直流环节、开关电源以及新能源汽车中都是必不可少的组件,被广泛应用于电力电子系统中^[1-4]。然而铝电解电容器在电力电子元件中的故障率高达60%^[5],其故障率仅次于开关器件。

铝电解电容器的常见故障类型包括结构性故障和参数故障^[6],前者由其在设计、制造、安装过程中存在的缺陷所引起;后者则是由其在使用过程中电解液蒸发引起的老化现象所造成,具体表现为电容值 C 的减小和其等效串联电阻(ESR)值 R_{ESR} 的增大。结构性故障主要由于其生产缺陷或部件使用不当所造成,故实际使用过程中参数故障的问题更常见。研究表明,当电解电容值与初始电容值相比变化约为20%或者 R_{ESR} 变为原来的2~3倍时即可认为电容器老化失效^[7-9]。由于铝电解电容器的失效率较高,为及时发现缺陷电容的存在,避免因电容器老化失效所造成的重大经济损失,目前已有诸多学者提出了多种方法测量参数 C 和 R_{ESR} ,以评估铝电解电容器的运行状态,主要包括离线式监测和在线式监测两大类。

对于离线式监测,文献[6]采用信号注入测量法,先将铝电解电容器与无感电阻相连,再将低频的交流电流信号注入铝电解电容器中,根据所测得的电压和电流计算 R_{ESR} ;文献[11]分析 R_{ESR} 和电容电

液体积之间的关系,比较电容电解液初始体积和实际体积的变化情况计算 R_{ESR} ;文献[17]基于离散的傅里叶变换,通过简单的RC电路测量铝电解电容器电压与电流的幅值和相位差,利用最小二乘法计算参数 C 和 R_{ESR} 。目前离线式监测方法通常需要把铝电解电容器从电路中拆卸下来再进行监测分析,过程繁琐,使用复杂,其监测结果存在较大误差。

对于在线式监测,文献[1]提出一种大功率交流变流器中直流侧 R_{ESR} 的在线监测方法,在变流器的运行过程中加入持续时间较短的短路测试电流,通过开关管的短路电流以及短路测试前后直流侧电压的变化量计算 R_{ESR} ,但所提方法需要在变流器中进行短路测试,影响变流器性能;文献[7]提出了一种连续模式下Buck变换器输出电容的 R_{ESR} 和 C 的在线监测方法,通过电容电压采样值、PWM驱动信号、占空比等参数求得 R_{ESR} 和 C ,但该方法针对特定的拓扑结构,很难应用于交流变流器;由于铝电解电容器的功率损耗主要来自ESR,文献[10]通过功率损耗的平均值与纹波电流的均方根值之比求得 R_{ESR} ,但在使用过程中需要保证电路处于稳态,才可保证铝电解电容器的功率损耗只来自于ESR,局限性较大。现有的在线监测技术虽然可以比较准确地测量出铝电解电容器的 R_{ESR} 和 C ,但大多针对特定的电路拓扑及运行工况,并不具有普适性。

考虑实际的铝电解电容器工作时电容处于不断充放电状态,其两端电流均为脉冲形式,可通过模拟电容的充放电情况近似还原电容的实际运行工况。基于此,本文提出一种基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容的监测方法,通过对铝电解电容器放电过程中的电压曲线实时采样,并结合电容放电过程中电压和电流之间的关系式,建立铝电解电容器ESR和电容的计算模型,通过测得的 R_{ESR} 和 C 评估其

收稿日期:2019-12-03;修回日期:2020-05-18

基金项目:湖南省科技领军人才计划(2019RS3014);南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180211)

Project supported by Hunan Science and Technology Leading Talents Plan(2019RS3014) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(ZBKJXM20180211)

运行状态。首先介绍铝电解电容器的等效电路结构模型及其失效机理;然后从理论上分析测量 R_{ESR} 和 C 的原理,并详细分析测量系统硬件电路的组成;最后搭建实验测试平台,验证所提监测方法的可行性。

1 铝电解电容器的结构模型及其失效机理

1.1 铝电解电容器的结构及其等效电路

铝电解电容器主要由 2 片铝箔(阳极铝箔和阴极铝箔)组成,铝箔片之间用浸在电解液中的绝缘纸隔开,既能有效防止铝箔片之间相互接触,又能吸附电解液^[12]。阳极铝箔片与电解质之间的区域构成以 Al_2O_3 膜为介质的电容器,在阴极铝箔片与电解质之间的另一侧区域也构成类似的电容器。该结构中 2 个电容串联,阴极侧的 Al_2O_3 膜要比阳极侧薄得多,因此总电容主要取决于阳极侧的电容^[13]。此外,通过蚀刻铝箔片表面可以使铝箔片的有效面积扩大为原来的 30~40 倍^[6],因此铝电解电容器具有体积小、电容值高的优势,在电力电子技术中被广泛应用。

附录 A 中图 A1 为铝电解电容器的等效结构和内部结构模型。根据铝电解电容器的内部结构并考虑其非理想特性,可以得到附录 A 中图 A2 所示的铝电解电容器等效电路模型^[6,14],则铝电解电容器的等效阻抗 Z_{cap} 可表示为:

$$Z_{\text{cap}} = R_0 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{1/R_2 + j\omega C_2} + j\omega L_{\text{ESL}} \quad (1)$$

其中, ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为纹波电流频率; R_0 为铝箔片、电容引出端及电极部分的等效电阻; R_1 为电解液和绝缘纸的等效电阻; C_1 为阳、阴极铝箔片之间的电容; R_2 、 C_2 分别为介电损耗电阻、电容; L_{ESL} 为电容引线和连接处的等效串联电感。化简式(1)可得:

$$Z_{\text{cap}} = \left[R_1 + R_0 + R_2 / (1 + \omega^2 C_2^2 R_2^2) \right] + j\omega L_{\text{ESL}} + \frac{1 + \omega^2 C_2 R_2^2 (C_1 + C_2)}{j\omega C_1 (1 + \omega^2 C_2^2 R_2^2)} \quad (2)$$

则 R_{ESR} 和 C 分别为:

$$\begin{cases} R_{\text{ESR}} = R_1 + R_0 + R_2 / (1 + \omega^2 C_2^2 R_2^2) \\ C = \frac{C_1 (1 + \omega^2 C_2^2 R_2^2)}{1 + \omega^2 C_2 R_2^2 (C_1 + C_2)} \end{cases} \quad (3)$$

由于 R_1 与电解液相关,电导率随着电解液温度的升高而增加,从而导致 R_1 减小,进而导致 R_{ESR} 减小。上述变化可表示为^[11]:

$$R_1 = R_{1,b} e^{\frac{T_b - T_s}{E_T}} \quad (4)$$

其中, $R_{1,b}$ 为在基准测量温度 T_b 下的电阻值,通常取 $T_b = 27^\circ\text{C} = 300\text{ K}$; T_s 为电容器的核心温度; E_T 为电容器的温度敏感系数。由式(3)和式(4)可知, R_{ESR} 为与温度和频率相关的函数^[5],且随使用温度和频率的升高而减小,如图 1 所示。

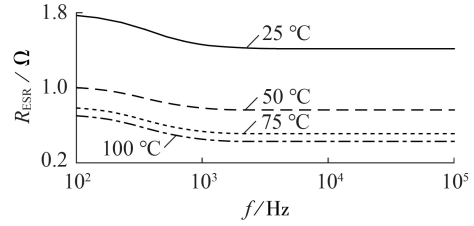


图 1 ESR 随着纹波电流频率和温度变化的关系图

Fig.1 Relationship of ESR vs. frequency of ripple current and temperature change

1.2 铝电解电容器的失效机理

电解液蒸发是铝电解电容器失效的主要原因之一,当电解液挥发到初始值的 40% 时,即可认为铝电解电容器老化失效。研究表明 R_{ESR} 和电解液体积 V 之间存在如下关系^[15-16]:

$$R_{\text{ESR}} / R_{\text{ESR0}} = (V_0 / V)^2 \quad (5)$$

其中, R_{ESR0} 和 V_0 分别为初始状态下铝电解电容的 ESR 值和初始电解液体积。由式(5)可知, ESR 的变化与电解液体积变化的平方成反比。当电解液体积挥发到初始值的 40% 时, ESR 值近似变为原来的 3 倍,即可认为铝电解电容器老化失效。由此可见, ESR 对电解液体积的变化较为敏感,因此本文采用 R_{ESR} 和 C 评估铝电解电容器的运行状态。为简化分析,在规定频率的交流电压信号下,铝电解电容器等效电路见图 2^[17]。



图 2 铝电解电容器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of aluminum electrolytic capacitor

2 铝电解电容器 ESR 和电容的监测原理

本文提出一种基于铝电解电容器放电规律的 ESR 和电容的监测方法,对铝电解电容器放电过程中的电压曲线进行实时采样,并结合电容放电过程中电压和电流之间的关系式,建立求解铝电解电容器 ESR 和电容的计算模型。整个监测系统的原理见图 3。

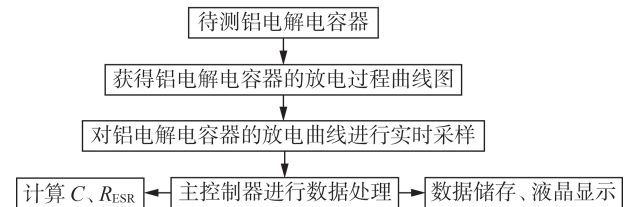


图 3 铝电解电容器 ESR 和电容测量系统原理框图

Fig.3 Principle block diagram of measurement system for ESR and capacitance of aluminum electrolytic capacitor

2.1 ESR 的监测原理

电容作为储能装置被广泛应用于背靠背式三相

变流器的直流环节中,是影响变流器系统可靠性和生命周期的关键因素。基于此,以AC/DC/AC系统为例详细说明铝电解电容器ESR及电容的监测原理,系统结构见附录A中图A3。

所提方法应用于三相系统的停机阶段,借助外部的监测电路对电容进行状态监测,进而求得铝电解电容器的 R_{ESR} 和 C 。具体的测量电路如图4所示。图中, R_C 为铝电解电容器的充电电阻; S_1 、 S_2 为开关,控制铝电解电容器的充、放电; R_{SE} 为铝电解电容器放电回路的均压电阻; R_a 为监测电路固有电阻总值,包括开关电阻、线路电阻以及接触电阻等,一般用近似值替代; R_s 为电流采样电阻; u_C 为电容电压; I_C 为放电回路电流; V_{OUT} 为采样电阻电压; V_{CC} 为电容充电电压。实际的 L_{ESL} 非常小^[16],故其影响可忽略不计。

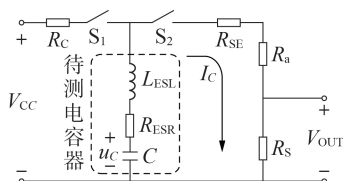


图4 监测电路模型

Fig.4 Model of monitoring circuit

闭合开关 S_1 ,断开开关 S_2 给电容器充电。待电容器两端充电至 V_{CC} 时,断开 S_1 、闭合 S_2 ,此时电容开始放电,放电过程中回路的电流 I_C 满足式(6)所示的关系,其中 V_{C0} 为电容放电初始电压。电容放电过程曲线见图5。图中, t_p 和 t_q 分别为电容放电过程中最大和最小电压所对应的时间点, $p, q \in \mathbb{N}^+$,且 $p < q$; Δt 为放电时间周期; V_{CP} 为电容放电过程中的峰值电压。

$$\begin{cases} u_C = I_C (R_{\text{ESR}} + R_{\text{SE}} + R_s + R_a) \\ I_C = -C \frac{du_C}{dt} \\ u_C = V_{\text{C0}} \end{cases} \quad (6)$$

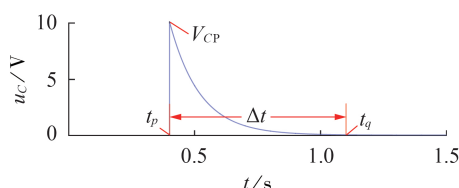


图5 电容放电曲线

Fig.5 Discharge curve of capacitor

由式(6)可得放电回路电流 $I_C(t)$,即:

$$I_C(t) = \frac{V_{\text{CC}}}{R_{\text{ESR}} + R_{\text{SE}} + R_s + R_a} e^{-\frac{t}{(R_{\text{ESR}} + R_{\text{SE}} + R_s + R_a)C}} \quad (7)$$

当 $t=0$ 时,可得放电回路中的峰值电流 I_P ,即:

$$I_P = \frac{V_{\text{CC}}}{R_{\text{ESR}} + R_{\text{SE}} + R_s + R_a} \quad (8)$$

由式(8)可知,通过改变 V_{CC} 和 R_s 即可改变 I_P 。其中采样电阻 R_s 两端的峰值电压 V_P 为:

$$V_P = I_P R_s = \frac{V_{\text{CC}} R_s}{R_{\text{ESR}} + R_{\text{SE}} + R_s + R_a} \quad (9)$$

对式(9)进行整理,可得:

$$R_{\text{ESR}} = V_{\text{CC}} R_s / V_P - R_s - R_{\text{SE}} - R_a \quad (10)$$

式(10)中 V_{CC} 、 R_s 以及 R_{SE} 均为已知值, V_P 可以通过高精度数字电压表或者示波器测量得到。从而实现 R_{ESR} 的测量。

2.2 电容的监测原理

根据铝电解电容器的简化等效电路模型,电容器两端的电压和电流之间的关系可表示为:

$$U_C(t_2) - U_C(t_1) = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I_C(t) dt + R_{\text{ESR}} (I_C(t_2) - I_C(t_1)) \quad (11)$$

其中, $U_C(t_1)$ 、 $U_C(t_2)$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻的电容电压; $I_C(t_1)$ 、 $I_C(t_2)$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻电容电流。

在1个周期内,流过电容的平均电流为0,即 $I_C(t_2) - I_C(t_1) = 0$ 。因此,在离散条件下,式(11)可以变换为式(12)。

$$U_C(t_q) - U_C(t_p) = \frac{1}{C} \left(\sum_{i=p+1}^{q-1} I_C(t_i) \Delta t + \frac{I_C(t_p) + I_C(t_q)}{2} \Delta t \right) \quad (12)$$

其中, t_i 为电容放电曲线中的采样时间点。

在电容放电过程中,通过对放电曲线进行实时采样,并根据式(13)求得 C ,进而实现对 C 的测量。

$$C = \frac{\sum_{i=p+1}^{q-1} I_C(t_i) \Delta t + \frac{I_C(t_p) + I_C(t_q)}{2} \Delta t}{U_C(t_q) - U_C(t_p)} \quad (13)$$

3 铝电解电容器ESR和电容的监测系统设计

3.1 系统框图

图6为 R_{ESR} 和 C 测量系统总体设计结构框图。首先通过直流电源给电容充电,同时主控芯片发出触发信号进行峰值检测。待获得脉冲电压的峰值后,经过采样记录电路峰值电压,进行相应的A/D转换后于控制电路进行进一步的处理。SD卡可以用来储存峰值数据以及测量过程中的实时数据,方便后续进行数据的处理和分析。LCD显示屏作为人

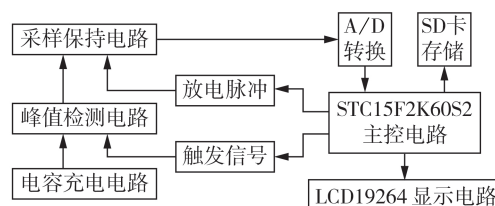


图6 铝电解电容器ESR和电容测量系统总体设计框图

Fig.6 Overall design block diagram of measurement system for ESR and capacitance of aluminum electrolytic capacitor

机交互界面,可以直接显示经过处理的 R_{ESR} 和 C ,用于判断电容是否失效。待测量结束后,由主控芯片发出放电脉冲信号,使采样保持电路复位,为下次测量做准备。以上各部分电路构成了铝电解电容器ESR和电容测量系统的硬件电路部分。

3.2 峰值信号采样保持电路

3.2.1 模拟开关电路的组成及其工作原理

模拟开关是一种三稳态电路,其可以根据使能端的状态决定输入、输出端口的状态。当使能端处于使能状态时,输出状态取决于输入状态;当使能端处于截止状态时,无论输入信号处于何种状态,模拟开关始终处于高阻状态。模拟开关具有功耗低、速度快、无机械触点、体积小和寿命高等诸多优点,在电力电子系统中已得到广泛应用。

一般而言,模拟开关电路由1个非门、2个或非门以及2个MOSFET电力场效应晶体管组成,如附录B中图B1所示。图中, A 、 B 分别为信号输入、输出端口信号; E 为使能端口信号; VT_1 和 VT_2 为电力场效应晶体管。当 E 和 A 均处于“1”(“1”表示导通)状态时, VT_1 导通, VT_2 截止,此时由 B 所在端口为输出端口;当 E 处于“1”、 A 处于“0”(“0”表示截止)状态时, VT_1 截止, VT_2 导通,此时输出信号状态为“0”,即保持输入、输出信号状态一致;而当 E 处于“0”状态时,则无论 A 所在输入端口是否有信号输入, VT_1 和 VT_2 均处于截止状态,整个电路对外呈高阻状态。附录B中表B1为该模拟开关电路的真值表。

本文中使用的模拟开关型号为四双向模拟开关CD4066,即每个CD4066的封装内部均有4个独立的模拟开关,每个模拟开关都有3个端口,即输入、输出端口和使能端口,其中输入和输出端口可互换。

3.2.2 采样保持电路

整个测量系统的关键为获取待测电容放电过程中的峰值电压,并对电容放电曲线进行采样,然后将所采集到的数据送入单片机中进行进一步处理,进而得出 R_{ESR} 和 C 。

本文所设计的反馈型峰值采样保持电路见附录B中图B2。图中, A_1 和 A_2 分别为输入和输出缓冲放大器,在结构上两者构成了1个电压跟随器; Q_1 和 Q_2 为CD4066内部的模拟开关; U_c 为电容电压; R 为反馈电阻; U_i 、 U_o 分别为输入、输出电压。其中 A_1 选用高增益放大器,用于提高采样保持电路的输入阻抗并减小其输出阻抗,从而降低电路的损耗并增大其输出功率。本设计中 A_1 、 A_2 分别选用TI公司的LM741、OP07运算放大器,其价格便宜且可以达到工作要求。使用CD4066模拟开关作为电路中的开关器件,其中 Q_1 和 Q_2 处于互补的工作状态。当 Q_1 断开、 Q_2 闭合时,电路处于信号采样状态,电容被充电

至 U_i ;当采样结束后,通过控制使 Q_1 闭合、 Q_2 断开,则电容两端的电压 U_c 保持在 Q_2 断开前的状态,即实现了峰值保持。

3.3 系统的辅助电源电路设计

本次设计选用麦威公司的MPS-3303C系列数字模拟电源,实验过程中对铝电解电容器进行充电。该电源的输出电压以及电流均连续可调,是具有高稳定性、高可靠性以及高精度的多路直流电源,其电压输出范围为0~30 V,电流输出范围为0~3 A。

本次设计的控制电路选用STC15F2K60S2单片机作为主控芯片,需要5 V电源供电。在峰值检测电路中所使用的运放OP07以及LM741需要 ± 5 V的双电源供电,此外电路中还需要3.3 V的电源为信号调理电路供电。基于此设计辅助电源电路,见附录B中图B3。图中,系统的5 V电源选用LM7805三端稳压芯片,其所需要的外围元件较少,芯片内部还有过流、过热及调整管等保护措施,此外为确保稳压芯片处于正常的运行状态,在其输入端口加入2个串联的稳压二极管稳定输入。而-5 V电源则通过ICL7660小功率极性反转电源转换芯片实现,其电路简单且只需外接2个电容值为10 μF 的钽电容 C_5 、 C_7 ,其转换效率高达98%。系统的3.3 V电源芯片选用AMS1117低漏失电压调整器,该芯片直流电压线性调整率可达0.035%,且带有限流和过热切断功能。本设计中选用的稳压芯片不仅价格便宜,而且输出电压稳定,稳压效果好。

4 实验结果及分析

为了验证所提出的基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容监测方法的可行性,搭建铝电解电容器 R_{ESR} 和 C 监测实验平台,见附录C中图C1。

进行监测时,峰值采样保持电路的采样频率为100 kHz,采样电阻为10 m Ω ,均压电阻为100 m Ω ,此处采样电阻取值较小,系统的采样精度较高。此外通过改变电容的充电电压 V_{CC} 以及均压电阻 R_{SE} ,可获得不同的电容放电脉冲电流,以模拟电容的不同运行工况,测试结果见图7。由图7可知,本次设计的ESR和电容监测实验平台在不同工况下测得的 R_{ESR} 和 C 基本一致,即测试平台基本不受电容运行工况的影响。

为了验证测量结果的准确性,在室温下通过阻抗分析仪(Keysight, E4990A)在频率为120 Hz的条件下进行测量,如附录C中图C2所示。测量结果为 $R_{\text{ESR}}=47.8$ m Ω , $C=1887$ μF 。

利用图C1中监测实验平台测得不同工况下铝电解电容器的 R_{ESR} 和 C ,并与阻抗分析仪测得的数据进行对比,误差分析结果如表1和表2所示。示波器

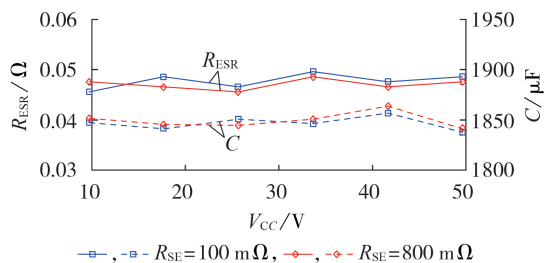


图7 不同工况下测得铝电解电容器的 R_{ESR} 和 C

Fig.7 R_{ESR} and C values of aluminum electrolytic capacitor measured under different working conditions

(Tektronix MDO4104C)采集得到的电容放电过程的波形见图8。

表1 R_{ESR} 及误差

Table 1 R_{ESR} and its error

V_{CC} / V	R_{ESR} / Ω		误差 / %	
	$R_{\text{SE}} = 100 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 800 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 100 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 800 \text{ m}\Omega$
10	0.046	0.048	3.77	0.42
18	0.049	0.047	2.51	1.67
26	0.047	0.046	1.67	3.77
34	0.050	0.049	4.60	2.51
42	0.048	0.047	0.42	1.67
50	0.049	0.048	2.51	0.42

表2 C 及误差

Table 2 C and its error

V_{CC} / V	$C / \mu\text{F}$		误差 / %	
	$R_{\text{SE}} = 100 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 800 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 100 \text{ m}\Omega$	$R_{\text{SE}} = 800 \text{ m}\Omega$
10	1 849	1 854	2.01	1.75
18	1 842	1 847	2.38	2.12
26	1 853	1 846	1.80	2.17
34	1 848	1 853	2.07	1.80
42	1 860	1 868	1.43	1.01
50	1 838	1 842	2.60	2.38

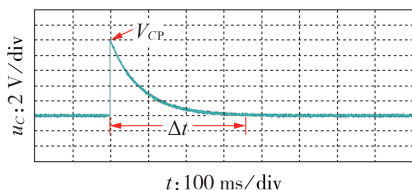


图8 电容放电曲线

Fig.8 Curve of capacitor discharge

由表1和表2可知,所提出的 R_{ESR} 和 C 监测实验平台在不同工况下测得的 R_{ESR} 及 C 基本一致,但与阻抗分析仪测得的数据相比仍存在一定误差,其中 R_{ESR} 的测量误差近似在5%以内, C 的测量误差近似在3%以内,而铝电解电容器在老化过程中容值与初始容值相比变化约为20%或者 R_{ESR} 变为原来的2~3倍时才认为该电容失效,故而这样的测量误差在允许的范围内。因此所提出的基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容监测方法可以较好地评估电力电子电路中铝电解电容器的运行状态,且基本不

受电路运行工况的限制。

5 结论

本文提出了一种基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容监测方法,该方法几乎不受电力电子电路拓扑结构及电容运行工况的限制,且成本低、操作简单、使用范围广,具有较好的普适性及可移植性。为验证该方法的有效性及其可行性,搭建了实验样机进行实验验证,可得到如下结论:

(1)铝电解电容器的老化表现为 R_{ESR} 的增加和 C 的减少,通过本文所提方法获得的 R_{ESR} 和 C 可为铝电解电容器运行状态提供评估依据;

(2)所提出的基于铝电解电容器放电规律的ESR和电容监测方法几乎不受电容运行工况的限制,仅需采样电容放电曲线,且成本低、操作简单,无需将电容器从装置中移除,所提方法具有较好的实用性和应用前景;

(3)根据所提出的方法搭建了实验样机并进行了实验验证,其中 R_{ESR} 的测量误差在5%以内, C 的测量误差在3%以内,符合工业中对铝电解电容器监测的技术要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙鹏菊,龚灿,杜雄,等.一种大功率交流变流器直流母线电容等效串联电阻的在线监测方法[J].中国电机工程学报,2017,37(17):5134-5142,5233.
SUN Pengju, GONG Can, DU Xiong, et al. An online monitoring scheme of equivalent series resistance for DC-link capacitor of high-power AC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5134-5142, 5233.
- [2] 周淦,薛赛,李剑,等.风机中参数变化对变流器直流侧电容可靠性的影响分析[J].电力自动化设备,2017,37(11):22-26,31.
ZHOU Qian, XUE Sai, LI Jian, et al. Effects of wind turbine parameters on reliability of DC-link capacitor in power converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 22-26, 31.
- [3] 叶英豪.基于关键器件的开关电源寿命预测[D].西安:西安电子科技大学,2014.
YE Yinghao. Life prediction for switching power supply based on key components[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
- [4] 姚芳,王斌,唐圣学,等.DC-link电容器在线状态监测方法综述[J].电力自动化设备,2019,39(11):188-197.
YAO Fang, WANG Bing, TANG Shengxue, et al. Review of on-line condition monitoring methods for DC-link capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 188-197.
- [5] KO Y, JEDTBERG H, BUTICCHI G, et al. Topology and control strategy for accelerated lifetime test setup of DC-link capacitor of wind turbine converter[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA: IEEE, 2016: 3629-3636.
- [6] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. A simple offline technique for evaluating the condition of aluminum-electrolytic capacitors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3230-3237.

- [7] 唐伟杰,姚凯,胡文斌,等. 一种无电流传感器的CCM Buck变换器输出电容ESR和C的在线监测方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(21):5569-5576.
TANG Weijie, YAO kai, HU Wenbin, et al. An online monitoring scheme of output capacitor's ESR and C for CCM Buck converters without current sensors[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5569-5576.
- [8] WANG H, BLAABJERG F. Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters—an overview [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3569-3578.
- [9] ZHOU Yuege, YE Xuerong, ZHAI Guofu. Degradation model and maintenance strategy of the electrolytic capacitors for electronics applications[C]//2011 Prognostics and System Health Managment Confernece. Shenzhen, China; IEEE, 2011: 1-6.
- [10] AELOIZA E, KIM J, ENJETI P, et al. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies[C]//2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany; IEEE, 2005: 2867-2872.
- [11] GASPERI M L. Life prediction modeling of bus capacitors in AC variable-frequency drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1430-1435.
- [12] PARLER S G. Improved spice models of aluminum electrolytic capacitors for inverter applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 929-935.
- [13] HARADA K, KATSUKI A, FUJIWARA M. Use of ESR for deterioration diagnosis of electrolytic capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1993, 8(4): 355-361.
- [14] WEN H, XIAO W, WEN X H. Comparative evaluation of DC-link capacitors for electric vehicle application[C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Hangzhou, China; IEEE, 2012: 1472-1477.
- [15] GASPERI M L. Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors[C]//IAS'96. 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-first IAS Annual Meeting. San Diego, CA, USA; IEEE, 1996: 1347-1351.
- [16] CHEN Y M, WU H C, CHOU M W, et al. Online failure prediction of the electrolytic capacitor for LC filter of switching-mode power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 400-406.
- [17] 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): 1644-1652.

作者简介:



涂春鸣

涂春鸣(1976—),男,江西南昌人,教授,博士,主要研究方向为电能质量与控制、电力电子技术在电力系统中的应用等(E-mail: chunming_tu@263.net);

柴鸣(1995—),男,湖北襄阳人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力电子装置及其组成部件的状态监测和可靠性(E-mail: chaimingxy@163.com);

余雪萍(1990—),女,湖北孝感人,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: 915982182@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Method for monitoring ESR and capacitance based on discharge rule of aluminum electrolytic capacitors

TU Chunming¹, CHAI Ming¹, YU Xueping¹, GUO Qi¹, CHEN Jiangxing², XIAO Biao¹, LONG Liu¹

(1. National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Materials Co., Ltd., Nanchang 330046, China)

Abstract: Aluminum electrolytic capacitor is the core component of power electronic system, and it is also one of the most easily failed power electronic components. Its operation status directly affects the stability of power electronic system. In order to find and replace the problematic aluminum electrolytic capacitor in time, a monitoring method of ESR (Equivalent Series Resistance) and capacitance based on the discharge rule of aluminum electrolytic capacitors is proposed. The calculation model of ESR and capacitance is established by sampling the voltage curve in the discharge process of aluminum electrolytic capacitors in real time and combining the relationship between voltage and current in the discharge process. Finally, a system is designed to monitor the changes of the ESR and capacitance values of aluminum electrolytic capacitor, and experimental verification is conducted. Experimental results show that this method can accurately measure the ESR and capacitance values of aluminum electrolytic capacitors, thus verifying the feasibility of the proposed method.

Key words: aluminum electrolytic capacitors; capacitance discharge curve; ESR; capacitance; operational status assessment; monitoring

附录 A

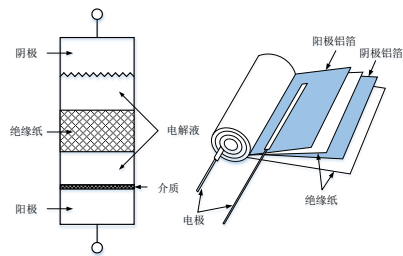


图 A1 铝电解电容器的等效结构和内部结构

Fig.A1 Equivalent structure and internal structure of aluminum electrolytic capacitor

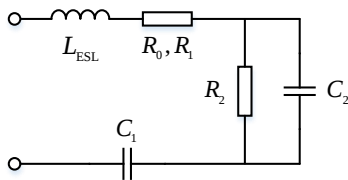


图 A2 铝电解电容器的等效电路模型

Fig.A2 Equivalent circuit model of aluminum electrolytic capacitor

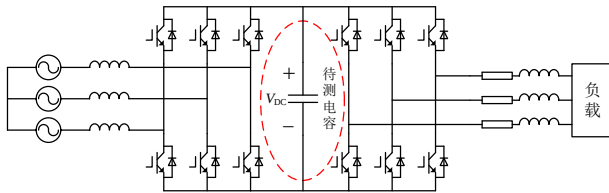


图 A3 AC/DC/AC 系统

Fig.A3 System of AC/DC/AC

附录 B

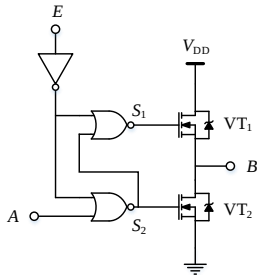


图 B1 模拟开关的基本工作电路

Fig.B1 Basic working circuit of analog switch

表 B1 模拟开关电路真值表

Table B1 Table of truth value of analog switch circuit

E	A	S_1	S_2	S_{VT1}	S_{VT2}	B
0	0	0	0	0	0	高阻
0	1	0	0	0	0	高阻
1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1

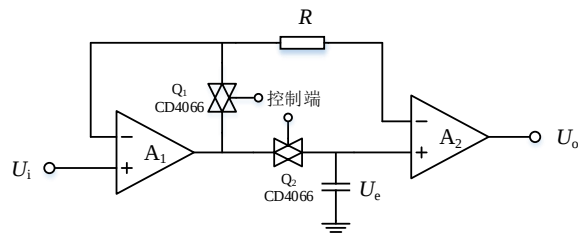


图 B2 反馈型峰值采样保持电路

Fig.B2 Feedback type peak sample and hold circuit

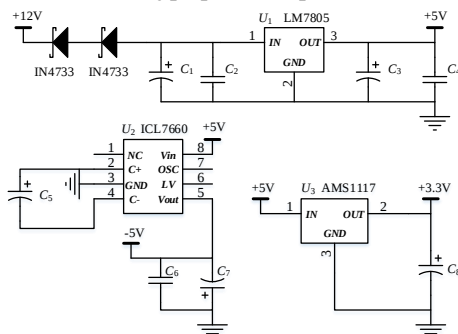


图 B3 系统的辅助电源电路

Fig.B3 Auxiliary power circuit of system

附录 C



图 C1 电解电容 ESR 和电容监测实验平台

Fig.C1 Experiment platform of monitoring of electrolytic capacitor ESR and capacitance



图 C2 阻抗分析仪测试

Fig.C2 Test of impedance analyzer