基于 ESR 的电解电容器在线故障诊断系统设计

安振华¹, 张桂新¹, 李凯迪², 伍珣¹, 成庶², 乔海洋³

(1.中南大学 自动化学院, 湖南 长沙 410075; 2.中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;
3.优立科轨道交通技术有限公司, 吉林 长春 130000)

摘 要:ESR(等效串联电阻)是评估电解电容器健康状态的重要指标之一,而由于电解电容器结构特殊性,ESR 值很难直接测量。为了实时监测电解电容器的健康状态,建立了电解电容器等效模型,分析并测试了 ESR 频率特性与温度特性,提出一种通过在线计算 ESR 评估电解电容器健康状态以实现在线故障诊断的方法。该方法将 ESR 实时计算值和初始值作比较,在同等工作条件下当前者相对于后者增加至一定数值时,可认为该电解电容器已失效,观测者可根据此机理及时进行更换处理。最后通过 dSPACE 半实物实验平台对新方法的有效性进行了实验验证。

关 键 词:电解电容器;等效串联电阻(ESR);在线;故障诊断
中图分类号:TM535.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2019)03-0594-07

现代电力电子技术广泛应用于工业、交通运输、电力系统等领域^[1]。其中,电解电容器尤其以铝电解电容器为代表,凭借其能量密度大、容量高以及价格低的特点备受青睐,然而,电化学工作原理也使其成为系统最薄弱的部件之一,不可预测性故障可能导致整个系统瘫痪。由文献[2]可知,在开关电源系统中电解电容器的故障率占总故障率的 60%,高居榜首。

电解电容器损耗主要表现为 ESR 不断增加,因此通过计算 ESR 值估算该电容器健康状态以实现在线故障诊断的目的。文献[3]表明,当电解电容的 ESR 增加到初始值的 2~3 倍,即可认为该电容器已经损坏,应及时更换。

电解电容器基于 ESR 的故障诊断方法可以分为离线和在线 2 种,2 种方法都是通过直接或间接计算 ESR 来评估电容器的健康状态^[4]。对于离线方法,文献[5-6]将信号发生器、电容器以及附加电阻组成回路,通过电容器两端的正弦电压波形利用

牛顿迭代法计算该电容器的 ESR 值。文献[7]根据离线傅里叶变换,利用阻抗矢量计算 ESR 值。文献[8]设计电容器充放电电路,利用最小二乘法离线计算 ESR。这些方法简单易行,而且成本低,但共同缺点是测量结果依赖测量组件精度,而且测量不方便,因为需要系统处于离线状态且取下电容器完成 ESR 值计算工作。

在线故障诊断方法是在系统运行的同时直接对电容器进行状态监测以实现故障诊断。文献[3]对 boost PFC 变换器根据中间直流环节电容侧一个周期内输入和输出功率差,建立相应的电容器 ESR 模型。文献[9]利用 UPS 系统已存在的精确电流传感器获取电容器电流信号,通过不同形式的卡尔曼滤波器求得 ESR。文献[10]提出一种通过测量电容器内部温度和气压来计算其电解液余量,估算 ESR 的方法。文献[11]针对光伏并网逆变器支撑电容通过采集功率管切换状态下电压变化和电流积分利用递推最小二乘法算法求 ESR 值。文献[12]在

boost 升压电路平台通过测量电感电流和负载电压利用充电和放电 2 种工作状态计算 ESR。文献 [13] 针对 buck 电路提出一种通过采样脉冲宽度和输出电压计算 ESR 值的方法。文献 [14] 利用分数阶积分原理和米塔格-累夫勒函数实现 ESR 在线计算更精确的目的。文献 [15] 针对 buck 电路提出一种利用罗氏线圈获取输出电压和电感电流积分,从而间接计算 ESR 的方法。文献 [16] 提出基于 Hartley 谐振拓扑的 ESR 和 C 检测电路,可以用于全电驱动汽车和中等功率开关电源的电容监测,但该方法针对不同规格的电容器需要单独调试参数。文献 [17] 针对电机驱动系统通过对电机负载注入交流信号并检测支撑电容的电压纹波和电流纹波信息计算 ESR,但该侵入式方法实际应用中的可行性和安全性有待商榷。和离线方法相比较,在线方法有很多优点,比如不需要使系统处于离线状态,可以实时监测 ESR 数值等,但上述方法主要有 2 点需要深入考虑:首先,由于计算原理依赖目标电容器所在的电路结构,对于其他电路结构是否适用值得商榷;其次,ESR 计算系统设计和实现算法复杂,这将会导致系统响应时间过长。

针对上述目前已有方法不足之处,本文从电解电容器内部结构出发,根据电解电容器老化机制建立等效模型,分析 ESR 的影响因素并通过实验进行测试和验证,提出一种基于在线计算 ESR 的电解电容器故障诊断方法,能够不依赖电容器所在电路结构,算法简单且适用性强。

1 电解电容器老化机制与等效模型

1.1 结构与等效模型

电解电容器以铝电解电容器为例,根据在不同的工作条件下可以用不同的等效模型表示,比较能全面反映其内部结构特性的等效电路如图 1 所示^[18]。

图 1 电解电容器原始等效电路

其中, R_1 是电极及其引出端子的电阻, R_2 是电解液电阻, 并联电阻 R_3 是金属氧化膜电阻, 电容 C_1 , C_2 分别表示阳极箔和阴极箔的电容量, 二极管 D 表示阳极金属氧化膜单向导通性, L 是电极及其引出端子引起的等效电感。这种等效电路比较复杂, 实际应用中会忽略数值非常小的 R_3 , 这样就可以合并 R_1 和 R_2 , 以及 C_1 和 C_2 , 等效电感 L 是由电极和引出端子所引起, 相对独立于温度和频率, 数值相对较小, 而且一般铝电解电容器工作频率不是很高, 可做忽略处理^[12], 本文采用图 2 所示等效电路。

图 2 电解电容器 ESR 等效模型

1.2 老化机制

由文献 [19-20] 可知, 电解电容器性能与介质氧化膜和电解液有非常大的联系。一方面, 在电解电容器工作过程中, 电解液的作用直接影响了金属氧化膜介质性能变化; 另一方面, 由于电解电容器很难做到完全密封性, 所以电解液会从密封口挥发, 内部反应产生的气体和因纹波电流造成的温升也会加速这一进程。根据文献 [21], 随着电解液挥发, 电解电容器 ESR 值会逐渐增大, 其关系可用 (1) 式表示

$$\frac{\text{ESR}}{\text{ESR}_0} = \left(\frac{V_0}{V} \right)^2 \tag{1}$$

式中, ESR 表示在温度 20℃ 时 ESR 值, ESR_0 表示初始 ESR 值, V 表示电解液体积, V_0 表示初始电解液体积。当电解液挥发掉其原始值的 30% ~ 40% 时, 电解电容器 ESR 值也会增加到初始值的 2~3 倍, 此时可认为该电解电容器已经损坏, 观测者应及时做更换处理。

2 ESR 温度特性和频率特性

随着电容器工作时间的增加, 电解液挥发使电容器 ESR 值增加, 但在相同时间点 ESR 值随着工作温度升高而减小, 主要是由于温度增加, 电解液电阻率减小。其关系可用 (2) 式表示^[22]

$$\text{ESR}_s = A + B e^{-T/C} \tag{2}$$

式中, ESR_s 为特定温度下 ESR 初始值, A, B, C 为常量, 取决于电容器种类, 具体数值可用实验方法测得。

根据电解电容器等效电路模型,可将电解电容器视为一个理想电容和一个纯电阻串联,其阻抗绝对值 Z 就是容抗和 ESR 之和,关系式为

$$Z = \sqrt{(\text{ESR})^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad (3)$$

不难理解,存在一个频率点 f_0 ,当频率 $f < f_0$ 时, $\frac{1}{2\pi fC} \gg \text{ESR}$,则 $Z \approx \frac{1}{2\pi fC}$,即电容器的阻抗主要表现为理想电容器的容抗,且随着频率的增加阻抗 Z 减小;而当频率 $f \geq f_0$ 时, $\frac{1}{2\pi fC} \ll \text{ESR}$,则 $Z \approx \text{ESR}$,即电容器的阻抗主要表现为 ESR,且基本保持恒定。

为验证电解电容器 ESR 温度特性与频率特性,本文选取 10 只全新的同种品牌规格为 2 200 μF , 450 V 铝电解电容为研究对象,在恒温箱提供的特

图 3 ESR 随温度变化曲线

图 4 电解电容器 ESR 和阻抗 Z 频率分布

图 5 ESR 随温度变化拟合模型

这样,只要获得电解电容器工作温度,就能计算出该温度点 ESR_s 作为该温度下的初始 ESR 值,由前文可知,可根据同等温度下 ESR 值增加量判断电解电容器健康状态。

3 在线故障诊断系统设计

3.1 电容器实时 ESR 计算的基本原理

通过前文分析可知,对于电解电容器在系统正常工作时,可以计算 ESR 评估其健康状态。

提取电解电容器纹波电压和电流,根据欧姆定律,可以得出

$$v_c = Z \cdot i_c \quad (4)$$

式中, v_c 为电容器纹波电压, i_c 为通过电容器的电流, Z 为电容器阻抗值。由文献[23]可知,中大型传

动系统开关频率普遍在 1 000 ~ 5 000 Hz,且由上一节可知,当电容器电压脉动频率在 7 kHz 以上时,其阻抗则主要表现为 ESR,因此可利用高通滤波器提取纹波电压与纹波电流信号 7 kHz 以上的谐波分量,根据(5)式和(6)式计算有效值,则由(4)式可以得到(7)式

$$v_{cf-rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{cf}^2(t) dt} \quad (5)$$

$$i_{cf-rms} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_{cf}^2(t) dt} \quad (6)$$

$$v_{cf-rms} = \text{ESR} \cdot i_{cf-rms} \quad (7)$$

(5)~(7)式中, v_{cf} 和 i_{cf} 分别为纹波电压与纹波电流信号 7 kHz 以上谐波分量, v_{cf-rms} 和 i_{cf-rms} 分别为 v_{cf} 和 i_{cf} 的有效值, T_s 为纹波电压和纹波电流信号周期。于是,在电容器正常运行时,ESR 可以通

过下式得到

$$ESR = v_{cf-rms} / i_{cf-rms} \tag{8}$$

因此,电容器 ESR 实时故障诊断系统可分为 4 个主要步骤:

- 1) 提取电容器纹波电压和电流波形信息 v_c 和 i_c ;
- 2) 设计高通滤波器,提取 7 kHz 以上谐波分量 v_{cf} 和 i_{cf} 并求有效值 v_{cf-rms} 和 i_{cf-rms} ,根据(8) 式计算实时 ESR 值;
- 3) 提取电容器运行温度 T ,根据(2)式计算作为该温度下电解电容器的初始值;
- 4) 通过比较器对比相同温度下 ESR 实时计算值与初始值 ESR_s ,确定电容器的健康状态。

3.2 实时健康状态识别的基本原理

为了实时反映电解电容器健康状态,本文设置参数 α 为 ESR 实时计算值相对 ESR_s 的增量,参数 H 为电容器健康状态等级。参数 α 计算公式如下式

$$\alpha = ESR / ESR_s \tag{9}$$

- H 参数设置如下:
- 当 $1 \leq \alpha < 2$ 时, $H = 1$,表示健康状态良好;
 - 当 $2 \leq \alpha < 3$ 时, $H = 2$,表示健康状态一般,建议更换;
 - 当 $3 \leq \alpha$ 时, $H = 3$,表示健康状态较差,发出故障警告。

这样,通过3.1节计算出的ESR值和(2)式计算的 ESR_s 就能得到电解电容器实时健康等级,提醒观测者进行相应的操作。

3.3 在线故障诊断系统原理图

图 6 是电解电容器在线故障诊断系统原理图,从图中可看出故障诊断系统主要分成 4 个部分。

图 6 在线故障诊断系统原理图

压获取电路原理图。图中, R_1 和 R_2 是分压电阻,电容 C 是隔离电容以隔离 v_1 中的直流成分,变比为 1 的电压互感器 T 起到采集交流电压信号和电气隔离的目的。

图 7 纹波电压获取电路

2) 电流采集环节。可采用罗氏线圈采集电解电容器的电流纹波 i_c 以实现非侵入采样。

3) 温度采集环节。通过温度传感器采集电解电容器外壳的工作温度,利用(2)式计算电解电容器 ESR 初始值 ESR_s 。

4) 逻辑运算环节。逻辑运算环节由 dSPACE 半实物仿真平台实现,完成电解电容器实时 ESR 计算和健康等级识别并输出结果。

3.4 电容器故障诊断系统的测试

3.4.1 系统测试设置

为验证本文提出的故障诊断方法,本文搭建了 在直流变换领域应用非常广泛的 boost (升压斩波) 电路,比如在光伏系统和功率补偿系统中广泛应用而且对 boost 电路稳定性要求非常高,而前文已分析在功率变换系统系统中电解电容器是最易损坏的元器件之一,因此对电解电容器的状态监测就显得非常重要。

图 8 在线故障诊断系统结构图

1) 电压采样环节。图 7 为本文设计的纹波电

表 1 为本文搭建的 boost 电路主元器件参数设置。电容器采用上述同品牌同规格的电解电容器,用温度传感器测量电解电容器的工作温度。图 8 为电解电容器在线故障诊断系统结构图。

表 1 boost 电路主元器件参数设置

E/V	开关频率/kHz	占空比	R/Ω
50	5	0.75	100

3.4.2 系统测试结果

根据(4)~(8)式可知,利用电容器电压和电流的纹波信息计算其等效串联电阻。图 9 为 dSPACE

图 9 电容器纹波电压和电流

采样的纹波电压和纹波电流,采样频率 $f_s = 80\text{ kHz}$,电容器工作温度 $T = 18^\circ\text{C}$,表 2 为系统计算结果。

表 2 中,ESR 为系统实时计算值,ESR_c 是在同种温度下利用 LCR 测量仪离线测量的数据,并作为实时计算值的参考标准。从表中数据可知,一方面,系统实时计算的 ESR 值的误差在 5% 左右,对电容器健康状态的判断几乎不会产生太大影响。另一方面,在同等温度下 ESR 计算值相对于 ESR 初始值, $\alpha = 1.22$,并输出健康等级 H 值为 1,显示健康状态良好。

表 2 ESR 计算结果

温度/ $^\circ\text{C}$	ESR/ $\text{m}\Omega$	ESR _c / $\text{m}\Omega$	ESR _s / $\text{m}\Omega$	H	误差/ %
18	22.0	20.9	18.8	1	5.3

4 结 论

本文阐述了电解电容器在正常工况下的老化机制,分析并测试了电解电容器 ESR 的温度特性和频率特性,建立了电解电容器 ESR 在线计算模型,并考虑了工作温度的影响,提出了电解电容器在线计算 ESR 以实现在线故障诊断的方法,并针对 boost 升压电路利用 dSPACE 实验平台对该方法的有效性进行了实验验证。

参考文献:

[1] 任磊. 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. Fault Feature Extraction Techniques for Power Devices in Power Electronic Converters: a Review[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3089-3101 (in Chinese)

[2] PANG H M, BRYAN P M H. A Life Prediction Scheme for Electrolytic Capacitors in Power Converters without Current Sensor [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2010: 973-979

[3] KAI Y, TANG W, XIAOPENG B I, et al. An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2016, 31(8): 5944-5951

[4] PU X S, NGUYEN T H, LEE D C, et al. Fault Diagnosis of DC-Link Capacitors in Three-Phase AC/DC PWM Converters by Online Estimation of Equivalent Series Resistance[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4118-4127

[5] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. Using Newton-Raphson Method to Estimate the Condition of Aluminum Electrolytic Capacitors[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007: 827-832

[6] TSANG K M, CHAN W L. Simple Method for Measuring the Equivalent Series Inductance and Resistance of Electrolytic Capacitors[J]. IET Power Electronics, 2010, 3(4): 465-0

[7] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. A Simple Offline Technique for Evaluating the Condition of Aluminum Electrolytic Capacitors[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3230-3237

- [8] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. An Automatic Technique to Obtain the Equivalent Circuit of Aluminum Electrolytic Capacitors[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2008
- [9] 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 Trans on Industry Applications, 2010, 46(4): 1644-1652
- [10] GASPERI M L. Life Prediction Modeling of Bus Capacitors in AC Variable-Frequency Drives[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(6): 1430-1435
- [11] SEPEHR A, SARADARZADEH M, FARHANGI S. A Noninvasive On-line Failure Prediction Technique for Aluminum Electrolytic Capacitors in Photovoltaic Grid-Connected Inverters [C] // Conference on Power Electronics and Drive Systems Technologies, 2016:356-361
- [12] BUIATTI G M, MARTIN-RAMOS J A, GARCIA C H R, et al. An Online and Noninvasive Technique for the Condition Monitoring of Capacitors in Boost Converters[J]. IEEE Trans on Instrumentation & Measurement, 2010, 59(8): 2134-2143
- [13] YAO K, TANG W, HU W, et al. A Current-Sensorless Online ESR and C Identification Method for Output Capacitor of Buck Converter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(12): 6993-7005
- [14] MALEK H, DADRAS S, CHEN Y. Fractional Order Equivalent Series Resistance Modelling of Electrolytic Capacitor and Fractional Order Failure Prediction with Application to Predictive Maintenance[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(8): 1608-1613
- [15] GIVI H, FARJAH E, GHANBARI T. Switch Fault Diagnosis and Capacitor Lifetime Monitoring Technique for dc-dc Converters Using a Single Sensor[J]. IET Science Measurement & Technology, 2016, 10(5): 513-527
- [16] ASTIGARRAGA D, ARIZTI F, IBANEZ F M, et al. Online Indirect Measurement of ESR and Capacity for PHM of Capacitors [C]//Control & Modeling for Power Electronics, 2014
- [17] NGUYEN T H, LEE D C. Deterioration Monitoring of DC-Link Capacitors in AC Machine Drives by Current Injection[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(3): 1126-1130
- [18] 陈永真. 电容器手册[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- CHEN Yongzhen. Capacitor[M]. Beijing, Science Press, 2008 (in Chinese)
- [19] 马皓. 铝电解电容器退化分析与故障预诊断[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 68-72.
- MA Hao. Fault Diagnosis and Failure Prediction of Aluminum Electrolytic Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 68-72 (in Chinese)
- [20] KHAN S A, KHERA N, ISLAM T, et al. An Online Method for Condition based Maintenance of Aluminum Electrolytic Capacitors[C]//Engineering and Computational Sciences, 2014:1-5
- [21] ZHOU Y, YE X, ZHAI G. Degradation Model and Maintenance Strategy of the Electrolytic Capacitors for Electronics Applications[C]//Conference on Prognostics and System Health Management, 2011: 1-6
- [22] GASPERI M L. Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors[C]//IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 1996: 1347-1351
- [23] VOGELSBERGER M A, WIESINGER T, ERTL H. Life-Cycle Monitoring and Voltage-Managing Unit for DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM Converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2011, 26(2): 493-503

A Design of Online Fault Diagnosis System Based on ESR for Electrolytic Capacitors

AN Zhenhua¹, ZHANG Guixin¹, LI Kaidi², WU Xun¹,
CHENG Shu², QIAO Haiyang³

(1.School of Automation, Central South University, Changsha 410075, China;
2.School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
3.Unique Railway Transport Technology Co.,Ltd, Changchun 130000, China)

Abstract: ESR(Equivalent Series Resistance) is one of the important indicators for evaluating health status of electrolytic capacitors. Due to the structural specificity of the electrolytic capacitors, ESR is difficult to measure directly. In order to monitor the health status of the electrolytic capacitor in real time, an equivalent model for the electrolytic capacitor is established. The ESR frequency characteristics and temperature characteristics are analyzed and tested. The method of online fault diagnosis by evaluating the health status of the electrolytic capacitor with on-line calculation of ESR is proposed. Comparing the calculated value of ESR real-time with the initial value, when the former increases to a certain threshold value with respect to the latter under the same working condition, the electrolytic capacitor can be considered as failed, and the observer can perform replacement processing according to this mechanism in time. Finally, the effectiveness of the method was verified by using the dSPACE semi-physical experimental platform.

Keywords: electrolytic capacitor;equivalent series resistance(ESR);online;fault diagnosis