

DC-link 电容器在线状态监测方法综述

姚芳^{1,2}, 王 彬^{1,2}, 唐圣学^{1,2}, 黄 凯^{1,2}, 李志刚^{1,2}

(1. 河北工业大学 电气工程学院 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室, 天津 300130;

2. 河北工业大学 电气工程学院 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 天津 300130)

摘要:直流支撑(DC-link)电容器是电力电子变换器的关键器件之一,它的可靠性会影响整个系统的可靠性。状态监测是估计电容器健康状态的一种有效手段,综合分析了电容器的健康状态参数和性能状态参数,针对近年来电容器的在线状态监测研究进行分类,将其分为了传感器法、注入法、电路模型法和智能监测法;介绍每种方法的原理和手段,对比分析各种方法的优缺点,其次,针对研究成果的监测对象和监测参数进行数据统计分析;最后提出电容器状态监测的后续研究方向。

关键词:直流支撑电容器;电容值;状态监测;ESR;参数辨识

中图分类号:TM 53

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908036

0 引言

直流支撑(DC-link)电容器是电力电子变流器的关键功率器件之一,广泛用于风电、光伏、航空航天和电动汽车等领域的功率变换设备。它能平衡变流器中输入源和输出负载之间的瞬时功率差,从而最大限度地减小直流环节的电压变化、滤除纹波。在电力电子变流器的部件中,电容器极易损坏,失效率仅次于功率器件^[1-3]。DC-link 电容器性能退化,会加重变流系统输入源的功率载荷,影响系统运行的安全性和可靠性。因此,DC-link 电容器的可靠性设计和在线状态监测技术备受关注。

状态监测是器件健康状态估计的有效手段之一。在线状态监测旨在及时发现系统及其部件的退化征兆或故障特征,在可能出现故障或者性能下降到影响正常工作之前,及时更换失效元件,避免故障发生,或者在故障发生时能实时监测到故障特征,及时进行保护或转入容错运行模式。近年来,国内外有大量电容器状态监测的研究成果,监测方法包括离线监测法^[4-6]和在线监测法^[7-9]。离线监测法需要先中断系统再测算健康状态参数,操作简单且容易实现,但该方法大多需要拆卸电容。在线监测法在系统运行期间实时监测健康状态参数,但其监测手

段比较复杂。

本文首先分析了DC-link 电容器的健康状态参数和性能状态参数;其次,从传感器法、注入法、电路模型法和智能检测法4种监测角度对DC-link 电容器的在线状态监测技术进行了综述;然后,对国内外相关研究成果进行分类、对比和分析;最后指出DC-link 电容在线状态监测技术发展趋势。

1 DC-link 电容器状态参数

典型的DC-link 电容器简化等效电路由等值电容 C 、等效串联电阻(ESR)和等效串联电感(ESL)串联组成,如图1所示。变流工况下,DC-link 电容器的电压 v_c 和电流 i_c 均富含多种谐波成分,而健康状态参数ESR、ESL和 C 受频率或温度影响。因此,DC-link 电容器电压 v_c 和电流 i_c 的波动与变流工况决定的幅频特性复杂相关。

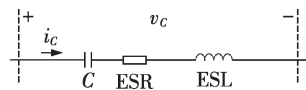


图1 DC-link 电容器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of DC-link capacitor

1.1 电容器的健康状态参数

DC-link 电容主要采用铝电解电容AEC(Aluminum Electrolytic Capacitance)和金属薄膜电容MFC(Metallized Film Capacitance)^[10]。AEC的容量密度大,但成本低、可靠性差,多用于低纹波电流应用场合,其健康状态参数是 C 和ESR。MFC的容量密度略低,ESR值较小难测,但耐压性能好,多用于高压高纹波电流应用场合,其健康状态参数是电容值 C 和耗散系数(DF)。

电容器在工作过程中因发热而消耗的能量称为电容器的损耗,DF定义为电容器每周周期有功损耗能量与储存能量之比,通常用损耗角正切值 $\tan \delta$ 表

收稿日期:2018-07-06;修回日期:2019-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477040);国家科技支撑计划项目(2015BAA09B01);河北省自然科学基金资助项目(E2017202284);河北省教育厅青年基金资助项目(QN2017316)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51477040), the National Key Technology Research and Development Program of China(2015BAA09B-01), the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2017202284) and Youth Foundation of Hebei Provincial Department of Education(QN2017316)

示,计算公式如下:

$$\lambda_{DF} = \tan \delta = \frac{R_{ES}}{X_C} = 2\pi f C R_{ES} \quad (1)$$

其中, λ_{DF} 为 DF 的值; R_{ES} 为 ESR 的值; X_C 为电容器的电抗; f 为频率。

随着电容的老化,电容器的 C 逐渐减小,而 ESR、DF 逐渐增大。AEC 的 C 降低到标称值 C_0 的 80% 或 ESR 增长到标称值 R_{ESnom} 的 2 倍时,即判之为失效;MFC 的 C 降低到标称值 C_0 的 95% 或 DF 增长到标称值 λ_{DF0} 的 3 倍时,即判之为失效。标称值和允许极限值之间的范围即为状态监测的目标区域,如图 2 所示。

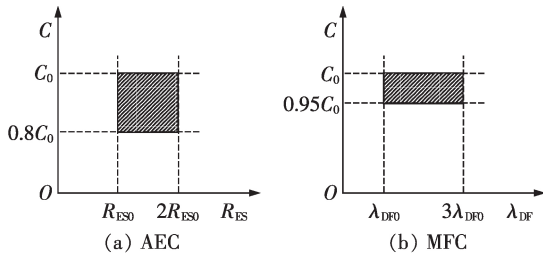


图 2 DC-link 电容器状态监测区域

Fig.2 Condition monitoring area of DC-link capacitor

1.2 电容器的性能状态参数

DC-link 电容器连接两侧变换器,以减少它们之间的功率差值,其性能状态一般用纹波电压 Δv_c 和纹波电流 i_c 表征,简化工作电路如图 3 所示。

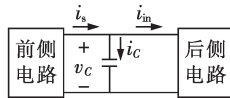


图 3 DC-link 电容器简化工作电路

Fig.3 Simplified working circuit of DC-link capacitor

电容器电流 i_c 是前后侧电路电流差值的交流成分,也是电容器的纹波电流。即:

$$i_c = i_s - i_{in} \quad (2)$$

进行电容器选型时,一般考虑纹波电流 i_c 的有效值 $I_{C,rms}$ [11-13],计算式为:

$$I_{C,rms} = \sqrt{I_{s,rms}^2 - I_{in,rms}^2} \quad (3)$$

其中, $I_{s,rms}$ 、 $I_{in,rms}$ 分别为前、后侧变换器交流电流分量的均方根值。

纹波电压 Δv_c 是电容电压瞬时值与初始值之间的差值。纹波电压的大小主要取决于纹波电流的变化情况。纹波电压 Δv_c 定义为:

$$\Delta v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt \quad (4)$$

此外,环境温度和热点温度会影响电容器的工作性能和使用寿命,其中热点温度还会影响电容器

的电流和运行安全性,可作为电容器的性能状态参数。

2 DC-link 电容器在线状态监测方法

工况下 DC-link 电容器的电容 C 、ESR 等健康状态参数难以直接获取,纹波电压 Δv_c 、纹波电流 i_c 等性能状态参数是在线状态监测的直接目标。一般对性能状态参数监测信息进行数学分析,获取健康状态参数,进而判定电容器的状态,从而进行后续的可靠性计算,状态监测流程如图 4 所示。但实际变流工况复杂,电容器的在线状态监测在技术手段和监测精度方面尚有技术瓶颈。根据监测手段,电容器在线状态监测方法主要有传感器法、注入法、电路模型法和智能监测法。

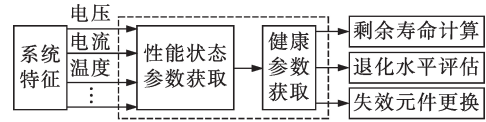


图 4 电容器监测一般流程

Fig.4 General process of capacitor online monitoring

2.1 传感器法

传感器法采用传感器直接监测电容器的电压或电流,进而根据电容器的特征推算 C 、ESR 等状态参数,对电容器状态进行监测。

P. Venet 等根据 10 kHz 以上电容阻抗和 ESR 的值近似相等特点,通过直接测量静止变流器中的 AEC 的纹波电流 i_c 、纹波电压 Δv_c 计算 ESR (其值记为 R_{ESc}),并设计选择开关电路比较 R_{ESc} 和从电容器中心温度 T_c 计算得到的无损 AEC 的 ESR (R_{ESl}),获取电容器在线状态,其监测精度为 10% [14]。该方案如图 5 所示,图中, α 、 β 和 γ 通过电容型号确定。

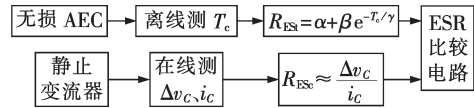


图 5 静止变流器 AEC 的 ESR 在线监测方案

Fig.5 ESR online monitoring scheme for AEC in static converter

电容器稳态功率损耗仅由 ESR 损耗所致,据此文献 [15-16] 均测量电容电流 i_c 和纹波电压 Δv_c ,计算平均损耗 P_c ,进而计算 AEC 的 ESR,如式 (5) 所示。

$$R_{ES} = \frac{P_c}{I_c^2} \quad (5)$$

其中, I_c 为电容电流 i_c 的均方根值。

文献 [15] 提出了一种 AEC 的 ESR 的实时诊断方法,用于判断可调速度驱动器 (ASD) 等设备中电容器的劣化状态;文献 [16] 考虑电容器 ESR 的温度依赖性,添加小型双面印刷电路板 (PCB) 监测 Boost

电路电容器的工作温度,提高ESR监测的准确性,但PCB需并联电阻确定位置,可能会降低变换器的可靠性。

文献[17-18]利用电容的阻抗特性进行在线监测。文献[17]中,A. Lahyani等提出一种AEC的ESR与时间 t 、工作温度 T_w 的线性逆模型,如式(6)所示。

$$\frac{1}{R_{ES}(t)} = \frac{1}{R_{ES0}} \left[1 - kt \times \exp\left(-\frac{4700}{T_w + 273}\right) \right] \quad (6)$$

其中, $R_{ES}(t)$ 为 t 时刻的ESR值; R_{ES0} 为ESR在零时刻的初始值; k 为电容器结构常数。

2010年孙凤艳等根据A. Lahyani^[17]提出的线性模型,以功率变换器中AEC纹波电压 Δv_c 和纹波电流 i_c 作为监测参数,通过快速傅里叶变换(FFT)分析得到电容ESR。开关频率为 f_s 时其阻抗如式(7)所示,提取 Z 的实部即得ESR,最大误差小于1%^[18]。

$$Z = R_{ES} + \frac{1}{j2\pi f_s C} \quad (7)$$

文献[19-20]均监测特定频率下的纹波电流。文献[19]中,M. A. Vogelsberger采用带通滤波(BPF)对脉冲宽度调制(PWM)变换电路滤波,然后测量中频段AEC纹波电压 Δv_{ic} 和纹波电流 Δi_{ic} ,进而计算ESR,如式(8)所示。

$$R_{ES} = \frac{\Delta v_{ic}}{\Delta i_{ic}} \quad (8)$$

文献[20]中,S. Prasanth等推导得到Boost升压变换器开关频率下AEC的ESR如式(9)所示。

$$R_{ESf_s} = \frac{v_{C_fPEAK} G_{ain} \cos(\theta_{f_s} - \varphi)}{i_{C_fPEAK}} \quad (9)$$

其中, v_{C_fPEAK} 和 i_{C_fPEAK} 分别为AEC电压和电流的开关频率分量的峰值; G_{ain} 为增益因子; θ_{f_s} 为电容器电压电流之间的相位差; φ 为电容 C 的端电压和ESR端电压的相位差。实验验证结果表明,在给定温度下,ESR估计值对实际值的相对误差值小于4%。

文献[21]针对DC/DC变换器,采用新型RC传感器的输出电压计算AEC的ESR(表达式如式(10)所示),并将计算得到的ESR与同条件下由RLC测试仪获得的ESR进行比较。这种新型的RC传感器成本比较低,结构紧凑,最大误差为6%。

$$R_{ES} = \frac{\Delta v_o - \frac{1}{MC} \left(\int \int V_{RC} dt \right) dt}{\frac{1}{M} \int V_{RC} dt} \quad (10)$$

其中, Δv_o 为输出的电压纹波; V_{RC} 为RC传感器的输出电压; M 为互感。

直接用传感器测量电容器的电流、电压以获得电容器状态的方法监测精度高,可以获得电容器参数具体的解析式;但该方法需对电容器串接电流传

感器,会新增寄生参数,影响变流器运行,工况下难以实现。

2.2 注入法

注入法在线状态监测的基本思路是:向电容器注入特定频率的电流或受控电压,计算输出侧电压电流,进而计算电容的ESR或 C 值。

文献[22-24]均在AC/DC/AC PWM变换器的AEC注入一定频率的理想电流,进而对AEC进行监测,最大误差小于1%。文献[22]中,D. C. Lee等在空载时,将频率低于线路频率的可控交流电流注入输入侧,使直流输出侧产生交流电压纹波,利用BPF提取输出侧的交流电压和电流分量,采用递推最小二乘法(RLS)计算 C ,如式(11)所示。

$$C(n+1) = C(n) + \mu(n) \times \text{BPF} \left[\frac{dv_c}{dt}(n) \right] \times \left\{ \text{BPF}[i_c(n)] - C(n) \times \text{BPF} \left[\frac{dv_c}{dt}(n) \right] \right\} \quad (11)$$

其中, $\mu(n)$ 为一个调整增量;BPF[·]表示BPF滤波值。

文献[23]中X. S. PU等在三相AC/DC变流器的输入端注入一个可控的交流电流分量,然后用数字滤波器处理DC-link电容器交流电压和电流分量,用RLS计算AEC的ESR,如式(12)所示。

$$R_{ES}(n+1) = R_{ES}(n) + \mu(n) \frac{di_{dc_mid}}{dt}(n) \times \left\{ \left[v_{dc_mid}(n) - v_{C_mid}(n) \right] - R_{ES}(n) \frac{di_{dc_mid}}{dt}(n) \right\} \quad (12)$$

其中, v_{dc_mid} 和 i_{dc_mid} 分别为直流电压和直流电流在正常抽样期中点测量的数值; v_{C_mid} 为电容电压在正常抽样期中点测量的数值。

文献[24]中T. H. Nguyen等针对PWM逆变式感应电机前端二极管整流器,提出一种基于在线电容估计的状态监测方案。在交流电机夜间工作时,向定子绕组中注入各种低阶奇数次谐波电流,使电容器电压在相同频率下波动,进而用RLS处理AEC电压和电流的交流分量以及对 C 值进行估计。

文献[25]针对DC/DC变换器中的AEC,采用占空比控制,将低频电流纹波注入AEC,获得不同温度下新电容器和老化电容器的低品质阻抗参数,并建立与工作温度无关的AEC失效判据,其最大辨识误差仅为0.64%。

文献[26]针对单相并网光伏逆变器的DC-link AEC,在夜间通过逆变器注入各种奇次谐波频率的电流,评估各种频率的DC-link电容器阻抗,采用最小均方根法(LMS)估计ESR和 C ,其中,ESR最大估计误差为3.62%, C 值的最大估计误差为2.77%。

文献[27-29]采用电压注入法进行电容器状态

监测。2008 年 K. W. Lee 等对逆变器的 DC-link 的 AEC 进行监测,提出电机停转时对定子绕组施加恒占空比 DC-link 电压,进而估算 AEC 的 ESR 和 C 值,其最大误差为 5%^[27-28]。该方法能自动提供与温度/负荷变化无关的 ESR 和 C 的估计值:

$$R_{ESR} = \frac{\Delta e_{c,avg}}{I_{ac,dc}} \quad (13)$$

$$C = \frac{DT_s I_{as,dc}}{\Delta v_{C1}} \quad (14)$$

其中, $\Delta e_{c,avg}$ 为 DC-link 电路电压 e_c 在 IGBT 1 个工作周期内的平均变换量; D 为占空比; T_s 为开关周期; $I_{as,dc}$ 为 A 相电流 I_{as} 的 DC 分量; Δv_{C1} 为电容电压 v_c 在 IGBT 1 个工作周期内的平均变换量。

A. G. Abo-Khalil 等针对三相 AC/DC/AC PWM 变换器的直流支撑 AEC,采用与文献[22]类似的方法,将频率低于线路频率的可控电压注入 DC-link 电压中,使直流侧产生交流功率波动,利用数字滤波器提取直流输出侧的交流功率分量,从而计算 C ,该方法的估计误差小于 0.15%^[29]。

文献[30]针对单相 AC/DC PWM 变换器,在输入(输出)侧注入一个受控的交流电流(或电压)分量,在直流输出侧产生交流电压分量,提取交流分量,对 C 值进行估计,进而诊断 AEC 的状态。

注入法主要针对功率变换器,在直流侧注入不同频率的电压/电流,获取交流侧的电压/电流,通过 RLS 或 LMS 等算法辅助,获取电容的健康状态。该方法无需添加电流传感器和破坏原有的电路,只需软件即可实现,监测精度很高,最大误差仅为 5%。但该方法需注入特定频率的电流或电压信号,可能造成系统运行负担。

2.3 电路模型法

电路模型法一般基于测试电路的状态电路或者 PWM 变换器原理测量其他数据,进而获得健康状态参数^[31]。

文献[32]开发了一种基于混合模型的电力电子电路参数辨识的通用方法,将开关状态 S 、电容电压 v_c 和电感电流 i_L 作为输入量,进而辨识 Buck 电路中 AEC 的 ESR,在线监测方案如图 6 所示。

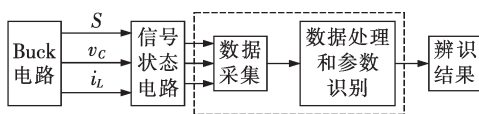


图 6 Buck 电路中 AEC 的 ESR 的在线监测方案

Fig.6 ESR online monitoring scheme of AEC in Buck circuit

文献[33-37]均通过电压值计算健康参数,监测电容的老化。2009 年 G. M. Buiatti 等针对铁路动力列车(HSTs)直流线路安装的 DC-link 电容,将电流传

感器与制动变阻器串联,只监测 MFC 电压 v_c ,采用 LMS 计算 DC-link 电容值 C 、2F 滤波器的电感 L_{2F} 和电容 C_{2F} ,最大测量误差仅为 2.5%^[33]。文献[34]通过监测开关型功率变换器的 AEC 电压计算 ESR,从而进行故障监测,监测方案如图 7 所示。该方案的监测电路可集成到 AEC 封装中,获得高可靠性的在线状态监测。

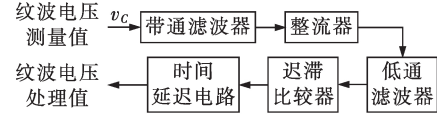


图 7 功率变换器 ESR 监测方案

Fig.7 ESR monitoring scheme of AEC in power converter

姚凯等提出了一种用于升压功率因数校正变换器(PFC)的直流支撑 AEC 电容 ESR 和 C 值的非侵入在线监测方法。该方法设计了 ESR 和 C 值在线监测方案,如图 8 所示。该方法在计算 ESR 和 C 值时,只需采样线路周期内触发电路电压 V_{in} 和隔离电压 V_g ,即可代替附加电流传感器,其最大的估计误差为 3.1%^[35-37]。

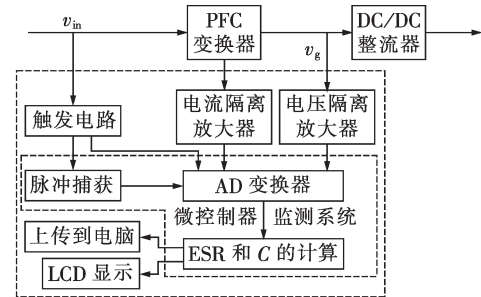


图 8 PFC 变换器 AEC 的 ESR 和 C 值在线监测方案

Fig.8 ESR and C online monitoring scheme of AEC in PFC converter

文献[38]根据连续导通模式(CCM)反激变换器的电路模型,开发了 AEC 的 ESR 和 C 的实时在线模型分别如式(15)、(16)所示。

$$R_{ES} = \frac{1}{V_o(1-D)^3 \left[\Delta v_o(0) - \Delta v_o \left(\frac{DT_s}{2} \right) \right]} \times \left\{ 12L_s f_s D \left\{ 2(1-D) \Delta v_o \left[\frac{(1+D)T_s}{2} \right] + (1+2D) \Delta v_o \left(\frac{DT_s}{2} \right) \right\} \times \left\{ (1-D) \Delta v_o \left[\frac{(1+D)T_s}{2} \right] + D \Delta v_o \left(\frac{DT_s}{2} \right) \right\} \right\} \quad (15)$$

$$C = \frac{V_o(1-D)^3}{12L_s f_s^2 \left\{ (1-D) \tilde{v}_o \left[\frac{(1+D)T_s}{2} \right] + D \tilde{v}_o \left(\frac{DT_s}{2} \right) \right\}} \quad (16)$$

其中, L_s 为次级电感; V_o 为输出电压; Δv_o 为输出电压的纹波。根据式(15)、(16)的计算模型, 用隔离放大电路捕捉开关周期某些时刻的输出电压纹波值, 进而计算 ESR 和 C 。最后进行在线监测系统的原型实验, 验证了在线监测方法的可行性。

针对带有隔离式降压变压器的变换器拓扑, J. Hannonen 等根据 AEC 的输出电压阶跃响应随电容减小的变化评价变换器输出电压动态变化^[39]。文献[40-41]选用电流重构法, 避免接入电流传感器直接测量纹波电流。A. Wechsler 等提出了基于电流重构的驱动器直流支撑 MFC 的在线状态监测系统, 如图9所示。DC-link 电容电流 i_c 可用 i_1-i_4 线性表达, 只需监测逆变器两相输出电流即可得到 i_c , 进而计算 C 值, 最大误差小于 5%。该方法完全独立于驱动器运行, 且不影响系统的容错性^[40]。

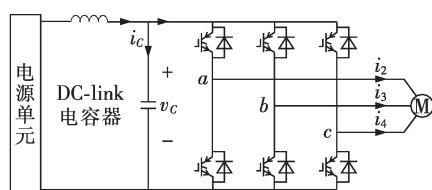


图9 逆变器MFC电流重构电路

Fig.9 Current reconstruction circuit of MFC in inverter

2016年, 吴宇提出了基于三相电流重构的三相变流器直流支撑 AEC 状态监测。该方法在三相系统的停机阶段, 利用三相输出电流进行纹波电流重构, 误差在 3% 以内^[41], 其 C 和 ESR 分别如式(17)、(18)所示。

$$C = \frac{\int_{t_1}^{t_2} i_c(t) dt}{v_c(t_2) - v_c(t_1)} \quad (17)$$

$$R_{ES} = \frac{v_c(t_3) - \left[v_c(t_2) + \frac{1}{C} \int_{t_2}^{t_3} i_c(t) dt \right]}{i_c(t_3)} \quad (18)$$

其中, t_1 和 t_2 为开关矢量处于零矢量位置的某 2 个时刻; t_3 为 t_2 后逆变器开关矢量处于非零矢量位置的时刻; $v_c(t_1)$ 、 $v_c(t_2)$ 和 $v_c(t_3)$ 分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 时刻的纹波电压。

文献[42]针对电动汽车驱动系统 DC-link 电容经牵引电机放电问题, 设计了一种限制电容放电电流的控制器, 其对 DC-link 电容的 C 值的估计精度高于 2%。该方法利用现有的变频调速系统进行电机驱动, 不对现有硬件进行修改。

光伏发电的发展促使更多的研究针对光伏系统中变换器中 DC-link 电容进行监测^[43-47]。文献[43]认为 2 次谐波阻抗由电容器电压和电流纹波决定, 提出根据 2 次谐波阻抗评估 AEC 健康状态的方法。该方法对调制器载波顶部或底部的电感电流滤波,

保留纹波电流低频分量以计算 2 次谐波阻抗。随着电容器的退化, 电压谐波变化显著, 可有效监测电容状态, 最大误差为 14.7%。

文献[44-45]均根据 PWM 的零矢量状态电压进行光伏逆变器 DC-link 电容监测, N. Agarwal 针对光伏 H5 逆变器, 直接测量光伏板输入电压 v_{pv} 和电流 i_{pv} , 在逆变器零状态下进行 AEC 的 C 值状态监测, 监测方案如图 10 所示^[44]。电容值 C 的计算式为:

$$C = \frac{i_{pv}}{(v_{pv,2} - v_{pv,1}) / \Delta t} \quad (19)$$

其中, Δt 为采样电压 $v_{pv,2}$ 、 $v_{pv,1}$ 的时间差。该方法最大误差值小于 1.5%, 亦适用于其他全桥式单相逆变器的 DC-link 电容器的 C 值监测。

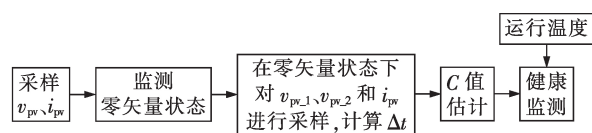


图10 H5逆变器的AEC C值监测方案

Fig.10 C monitoring scheme of AEC in H5 inverter

由于电容电流有 2 次谐波和开关频率成分, 文献[45]在文献[43-44]的基础上, 将采样频率等于开关频率, 从而消除开关频率成分, 然后利用 2 次谐波电压电流求取 2 倍基频的电容阻抗, 从而进行 AEC 状态估计, C 值最大误差为 2.56%^[45]。

文献[46-47]针对光伏系统的最大功率点进行 DC/DC 升压转换器 AEC 的在线监测。文献[16]针对最大功率点跟踪 (MPPT) 控制器, 利用 MPPT 算法, 在 CCM 和不连续导通模式 (DCM) 下计算相关系数从而获得 ESR, 最后通过 ESR 确定工作温度, 如图 11 所示, 其仿真和实验误差均小于 6.2%^[46]。文献[17]提出了一种监测功率提取效率 (PEE) 技术, 该方法推导了 PEE 与电容 C 和 ESR 的关联数学模型, 提出基于 PEE 的测量更换电容器的标准。仿真和实验的 PEE 估计值误差在 1% 以内^[47], 但该方法只局限于单极单相并网光伏逆变器。

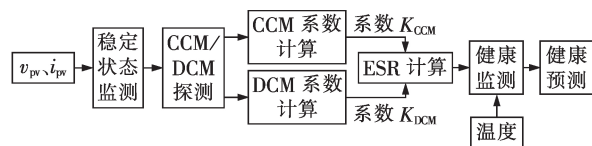


图11 利用MPPT的ESR监测方案

Fig.11 ESR monitoring scheme based on MPPT

电路模型法计算精度高, 避免了电流传感器直接测量纹波电流。但该方法需针对特定电路, 设计和计算过程非常复杂。

2.4 智能监测法

智能监测法不关注 DC-link 电容纹波电压和纹波电流与健康状态参数的解析关系, 而是应用卡尔

曼滤波法、遗传算法、神经网络算法等先进算法对变流器已知信息加工处理,从而获得健康状态参数。

马皓等构建 Buck 电路的混杂系统模型^[48-60],对 AEC 的 C 值和 ESR 进行监测与诊断。该方法能实现电容参数的在线辨识和故障诊断,但其对 C 值的最大误差超过 5%,ESR 的最大误差小于 5%^[49-50]。

卡尔曼滤波法^[51]也是电容监测的经典方法。2009 年 K. Abdennadher 等考虑环境温度,提出用卡尔曼滤波进行 AEC 的 ESR 和 C 值参数辨识的方法,进而可进行在线故障诊断^[52-53],如图 12 所示。图中, U_c 、 I_c 分别为电容电压和电容电流的平均值; K 为卡尔曼滤波的迭代次数。

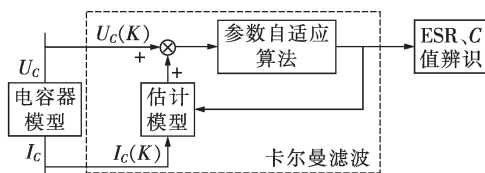


图 12 卡尔曼滤波 AEC ESR 和 C 监测方案

Fig.12 ESR and C monitoring scheme of AEC based on Kalman filtering algorithm

2010 年,文献[54]采用时域算法和卡尔曼滤波算法对 AEC 的 ESR 和 C 值分别进行参数辨识,仿真结果表明,时域算法对 ESR 的估计精度明显高于卡尔曼滤波法,但是对于 C 值的估计精度低于卡尔曼滤波。文献[55]对 Buck 电路的输出电压和电感电流进行经验模态分解(EMD),得到多个本征模式函数(IMFs),再对纹波电压 Δv_c 和纹波电流 i_c 进行 Hilbert-Huang 变换,进而计算出 ESR 值,其估计误差小于 5%。

文献[56]建立 Buck 电路频域模型,并对其进行 FFT 分析,将电路参数辨识转换为目标优化问题,用遗传算法求解 AEC 的 C 值和 ESR 值。但 FFT 和遗传算法均会影响辨识精度,该方法的仿真与实验结果误差比较大。

神经网络算法被广泛应用于电力电子器件的可靠性分析^[57-59]。2015 年, H. Soliman 等将电容值 C 作为估计指标,将变换器的输入/输出信息和 Δv_c 作为人工神经网络的输入数据,对背靠背变换器的 DC-link 电容进行参数辨识,估计误差小于 0.2%。该方法不需附加硬件电路和注入外部信号,成本低,对 AEC 和 MFC 的状态监测均适用;但实际应用中,该方法在有些情况下无法获得辨识需要的电压和电流信息,可能影响监测精度^[59]。

文献[60]将模糊逻辑和神经网络算法相结合,基于新模糊神经元模型,对被测设备阻抗和退化数据进行实时处理(时间序列预测),根据式(20)计算 ESR,并对 MFC 进行实验验证。该方法可准确估计 ESR,但需创建数据库,并进行健康状态参数的训练

学习。

$$R_{ES} = f_0(Z_{f0}) + \dots + f_i(Z_{fi}) + \dots + f_n(Z_{fn}) \quad (20)$$

其中, $f_i(Z)$ 为通过神经网络训练获得模糊神经网络结构函数; n 为神经网络训练数; 对于 MFC 而言, $n=4$ 对应于在 t 时刻开关频率为 200、300、400、500 Hz 时分别测量的阻抗 Z_{f1} 、 Z_{f2} 、 Z_{f3} 和 Z_{f4} 。阻抗序列的第一位是健康状态的 ESR 初始值,即 $Z_{f0}=R_{ES0}$ 。

文献[61]中, T. Kamel 等基于自适应神经模糊推理系统(ANFIS)算法监测功率变换器里 2 个直流滤波器中 AEC 的老化,将变换器的输入电压和跨直流滤波器的电压作为 ANFIS 单元的输入,以 ANFIS 单元的输出作为识别功率变换器中电容老化故障的指标,故障辨识的最大误差仅为 0.3,该方案示意图如图 13 所示。图中, V_s 为输入的三相均方根电压; $V_1\%$ 和 $V_2\%$ 为 2 个滤波电容电压测量值和估计值比值的百分比; 0、1、2 分别对应正常状态、 C_1 老化、 C_2 老化。

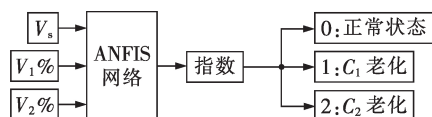


图 13 基于 ANFIS 网络的功率变换器 AEC 的 C 值监测方案

Fig.13 C monitoring scheme of AEC in power converter based on ANFIS network

上文提及的几种高级算法均不需附加硬件电路,在未知电路的条件下,通过已知数据进行一定的训练学习,推导出内部算法。这些算法前期的复杂计算和设计步骤一定程度上加大了监测的误差,导致监测效果并不理想,因此提高实验精度是智能监测法未来的研究方向之一。

3 结论与展望

3.1 结论

本文根据监测手段的不同,综述了电容器在线状态监测的 4 种常用方法。传感器法在软件上难度最小,但是在原有电路中接入电流传感器会破坏电路,需要很大的硬件成本,工业可操作性低;注入法、电路模型法和智能检测法均避免了采用传感器破坏电路,但是注入法注入的特定频率电流可能会对电路可靠性造成影响;电路模型法和智能监测法的硬件成本很低,但需要很高的软件成本(复杂的设计计算过程),智能监测法在实际系统中可能产生较大误差。这几种方法各有利弊,方法特点及应用范围如附录中的表 A1 所示。

根据 DC-link 电容器类型和监测参数类型对 2000 年至今有关电容器在线监测的文献成果进行统计,发现:

(1)85%的研究成果只针对AEC进行状态监测研究,7%的研究成果只针对MFC进行状态监测研究,8%的研究成果虑及2种电容类型,显然对MFC的状态监测研究并未得到足够重视;

(2)选择ESR、 C 和同时选择ESR和 C 作为状态监测参数的研究成果比例分别为35%、31%和28%,只有6%的成果选择其他变量作为状态监测参数,少数离线监测法选择监测电容的DF值,少数在线监测技术监测介质损耗角,尚无成果涉及金属损耗^[62-64]。DC-link电容器状态监测成果统计如附录中的图A1所示。

综述成果的时间分别与相对误差如附录中的图A2所示,图中,误差未知的成果用0代替。由图A2可得如下结论。

(1)传感器法是早期电容在线监测的主要方法,近五年来智能监测法和电路模型法的应用明显增多,电容器状态监测逐渐由传统的传感器法向无传感器法转变,这减少了硬件成本,但对软件要求更加严苛。

(2)除少数成果对ESR的监测误差超过10%外,大部分成果对于ESR的监测误差均小于5%,基本满足AEC对ESR监测精度的要求。但MFC和AEC的 C 值失效判据分别为低于标称值的95%和80%,MFC的 C 值监测误差至少不高于1%,AEC的 C 值监测误差至少不高于5%。显然,大部分成果对于MFC的 C 值监测精度并没有达到要求,无法工程应用。

此外表A1还表明,从成果的应用领域来看,大部分研究针对功率变换器,其中虑及光伏系统的成果占比很大、高达20%。

3.2 展望

作为变流器中高失效概率的功率器件之一,DC-link电容器的可靠性问题一直备受关注。为及时发现电容器的退化状态,避免发生电路故障,电容器的在线监测十分必要。DC-link电容器在线状态监测技术在监测参数、监测对象和监测精度方面均有发展空间。

(1)电路模型法和智能监测法既无硬件负担,也不需要注入电流,仅依靠软件操作,监测优势明显。电容器在线监测技术有赖于把电路模型法和智能监测法发展成熟。

(2)同时在线监测 C 、ESR等健康状态参数和热点温度等性能状态参数,有助于电容器的可靠性设计、故障预诊断和寿命预测。

(3)MFC在电动汽车等高纹波应用领域优势明显,其可靠性问题备受关注,需要在线状态监测。因此,在线状态监测技术应该更多地将MFC纳为监测对象。

(4)实现工况下DF的在线监测,并基于此获取电容健康状态,是有待解决的关键问题。

(5)进一步提高电容器 C 值的估计精度,实现工况下电容器的高精度状态监测,仍是未来电容器状态监测最为主要的目标之一。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] YANG S Y, BRYANT A B, MAWBY P, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [2] BRAMOUILLE M, MICHALZYK P, MARRET J P, et al. Ultimate properties of the polypropylene film for energy storage capacitors[C]//28th IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference. Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2001: 362-365.
- [3] YANG S, XIANG D, BRYANT A, et al. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(11): 2734-2752.
- [4] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. An economic offline technique for estimating the equivalent circuit of aluminum electrolytic capacitors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(12): 2697-2710.
- [5] 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.
- [6] AMARAL A M R, CARDOSO A J M. Using Newton-Raphson method to estimate the condition of aluminum electrolytic capacitors[C]//2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Vigo, Spain: IEEE, 2007: 827-832.
- [7] SUN P, GONG C, DU X, et al. Online condition monitoring for both IGBT module and DC-Link capacitor of power converter based on short-circuit current simultaneously[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3662-3671.
- [8] AHMAD M W, AGARWAL N, ANAND S. Online monitoring technique for aluminum electrolytic capacitor in solar PV-based DC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 7059-7066.
- [9] BUIATTI G M, MARTIN-RAMOS J A, ROJAS GARCIA C H, et al. An online and noninvasive technique for the condition monitoring of capacitors in boost converters[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(8): 2134-2143.
- [10] 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.
- [11] 裴雪军, 陈材, 康勇. 三相电压源逆变器直流侧支撑电容的电压脉动分析与设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 254-259, 269. PEI Xuejun, CHEN Cai, KANG Yong. Analysis of voltage ripple and design for DC-link capacitor in three-phase voltage

- source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 254-259, 269.
- [12] 张国荣, 沈奇. 单相有源电力滤波器直流侧电容与电压波动关系分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 110-115.
- ZHANG Guorong, SHEN Qi. Analysis of relationship between DC side capacitor of single-phase active power filter and voltage fluctuation and capacitance design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 110-115.
- [13] LYU Xiaofeng, LI Yanchao, CAO Dong. DC-Link RMS current reduction by increasing paralleled three-phase inverter module number for segmented traction drive[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 171-181.
- [14] VENET P, PERISSE F, EL-HUSSEINI M H, et al. Realization of a smart electrolytic capacitor circuit[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8(1): 16-20.
- [15] AELOIZA E, KIM J H, ENIETI P, et al. A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies[C]//IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. Recife, Brazil: IEEE, 2005: 2867-2872.
- [16] 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, 2001, 26(2): 493-503.
- [17] LAHYANI A, VENET P, GRELLLET G, et al. Failure prediction of electrolytic capacitors during operation of a switch mode power supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(6): 1199-1207.
- [18] 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, 2010, 24(1): 29-33.
- 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 instruction, 2010, 24(1): 29-33.
- [19] 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): 493-503.
- [20] PRASANTH S, SATHIK M H N, SASONGKO F, et al. Online equivalent series resistance estimation method for condition monitoring of DC-link capacitors[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017: 1773-1780.
- [21] FARJAH E, GIVI H, GHANBARI T. Application of an efficient Rogowski coil sensor for switch fault diagnosis and capacitor ESR monitoring in nonisolated single-switch DC-DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(2): 1442-1456.
- [22] LEE D, LEE K, SEOK J, et al. Online capacitance estimation of DC-link electrolytic capacitors for three-phase AC/DC/AC PWM converters using recursive least squares method[J]. IEEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152(6): 1503-1508.
- [23] 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 Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4118-4127.
- [24] HUYEN T H, LEE D C. Deterioration monitoring of DC-link capacitors in AC machine drives by current injection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1126-1130.
- [25] AHMAD M W, AGARWAL N, KUMAR P N, et al. Low-frequency impedance monitoring and corresponding failure criteria for aluminum electrolytic capacitors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5657-5666.
- [26] AGARWAL N, AHMAD M W, ANAND S. Quasi-online technique for health monitoring of capacitor in single-phase solar inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5283-5291.
- [27] KIM M, LEE K, YOON J, et al. Condition monitoring of DC link electrolytic capacitors in adjustable speed drives[C]//2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007: 237-243.
- [28] LEE K W, KIM M, YOON J, et al. Condition monitoring of DC-link electrolytic capacitors in adjustable-speed drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1606-1613.
- [29] ABO-KHALIL A G, LEE D C. DC-Link capacitance estimation in AC/DC/AC PWM converters using voltage injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1631-1637.
- [30] PU X, NGUYEN T H, LEE D C, et al. Capacitance estimation of DC-link capacitors for single-phase PWM converters[C]//2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference. Wuhan, China: IEEE, 2009: 1656-1661.
- [31] WU Y, DU X. A VEN condition monitoring method of DC-link capacitors for power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1296-1306.
- [32] MA Hao, WANG Linguo. Fault diagnosis and failure prediction of aluminum electrolytic capacitors in power electronic converters[C]//31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Raleigh, NC, USA: IEEE, 2005: 842-847.
- [33] BUIATTI G M, MARTÍN-RAMOS J A, AMARAL A M R, et al. Condition monitoring of metallized polypropylene film capacitors in railway power trains[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(10): 3796-3805.
- [34] 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.
- [35] 姚凯, 唐伟杰, 毕晓鹏, 等. Boost PFC变换器直流母线电容等效串联电阻和容值的一种在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2677-2686.
- YAO Kai, TANG Weijie, BI Xiaopeng, et al. An online monitoring method of DC-Link capacitor's ESR and C for Boost PFC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2677-2686.
- [36] YAO Kai, TANG Weijie, BI Xiaopeng, et al. An online monitoring scheme of DC-link capacitor's ESR and C for a Boost PFC converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,

- 2016,31(8):5944-5951.
- [37] 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.
- [38] YAO K, CAO C, YANG S. Noninvasive online condition monitoring of output capacitor's ESR and C for a flyback converter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3190-3199.
- [39] HANNONEN J, HONKANEN J, STROM J, et al. Capacitor aging detection in a DC-DC converter output stage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(4): 3224-3233.
- [40] WECHSLER A, MECROW B, ATKINSON D, et al. Condition monitoring of DC-link capacitors in aerospace drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1866-1874.
- [41] 吴宇. 三相变流器中直流母线电容的状态监测技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- WU Yu. Study on condition monitoring technique of DC-link capacitors in three-phase AC/DC/AC PWM power converters[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [42] KIM M, SUL S K, LEE J. Condition monitoring of DC-link capacitors in drive system for electric vehicles[C]//2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Seoul, Korea: IEEE, 2012: 633-637.
- [43] ARYA A, AHMAD M W, AGARWAL N, et al. Capacitor impedance estimation utilizing DC-link voltage oscillations in single phase inverter[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(9): 1046-1053.
- [44] AGARWAL N, AHMAD M W, ANAND S. Condition monitoring of DC-link capacitor utilizing zero state of solar PV H5 inverter[C]//2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering(CPEPOWER-ENG). Bydgoszcz, Poland: IEEE, 2016: 174-179.
- [45] AHMAD M W, KUMAR P N, ARYA A, et al. Noninvasive technique for DC-Link capacitance estimation in single-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3693-3696.
- [46] AHMAD M W, AGARMAL N, ANAND S. Online monitoring technique for aluminum electrolytic capacitor in solar PV-based DC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 7059-7066.
- [47] AGARMAL N, ARYA A, AHMAD M W, et al. Lifetime monitoring of electrolytic capacitor to maximize earnings from grid-feeding PV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 7049-7058.
- [48] LENNARTSON B, TITTUS M, EGARDT B, et al. Hybrid systems in process control[J]. IEEE Control Systems, 1996, 16(5): 45-56.
- [49] 张志学, 马皓, 毛兴云. 基于混杂系统模型和事件辨识的电力电子电路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 51-55.
- ZHANG Zhixue, MA Hao, MAO Xingyun. Fault diagnosis for power electronic circuits based on hybrid system theory and event identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 51-55.
- [50] 马皓, 毛兴云, 徐德鸿. 基于混杂系统模型的DC/DC电力电子电路参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 50-54.
- MA Hao, MAO Xingyun, XU Dehong. Parameter identification of DC/DC power electronic circuits based on hybrid system model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 50-54.
- [51] KALMAN R E. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Transactions of the ASME, Journal of Basic engineering, 1960, 82(series D): 35-45.
- [52] 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.
- [53] ABDENNADHER K, VENET P, ROJAT G, et al. Online monitoring method and electrical parameter ageing laws of aluminium electrolytic capacitors used in UPS[C]//2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. Barcelona, Spain: IEEE, 2009: 1-9.
- [54] 周慧德. 开关电源中铝电解电容可靠性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- ZHOU Huide. Research on reliability of aluminum electrolytic capacitor in SMPS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [55] WANG Guohui, GUAN Y, ZHANG J, et al. ESR estimation method for DC-DC converters based on improved EMD algorithm[C]//Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing). Beijing, China: IEEE, 2012: 1-6.
- [56] 孙凤艳, 王友仁, 林华, 等. 基于频域建模与遗传算法的电力电子电路参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 99-104.
- SUN Fengyan, WANG Youren, LIN Hua, et al. Parameter identification of power electronic circuit based on transfer function model and genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 99-104.
- [57] SOLIMAN H, DAVARI P, WANG H, et al. Capacitance estimation algorithm based on DC-link voltage harmonics using artificial neural network in three-phase motor drive systems[C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017: 5795-5802.
- [58] SOLIMAN H, ABDELSALAM I, WANG H, et al. Artificial neural network based DC-link capacitance estimation in a diode-bridge front-end inverter system[C]//2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEC 2017-ECCE Asia). Kaohsiung, China: IEEE, 2017: 196-201.
- [59] SOLIMAN H, WANG H, GADALLA B, et al. Condition monitoring for DC-link capacitors based on artificial neural network algorithm[C]//2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Riga, Latvia: IEEE, 2015: 587-591.
- [60] SOUALHI A, MAKDESSI M, GERMAN R, et al. Health monitoring of capacitors and supercapacitors using the neo-fuzzy neural approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1): 24-34.
- [61] KAMEL T, BILETSKIY Y, CHANG L. Capacitor aging detection for the DC filters in the power electronic converters using ANFIS algorithm[C]//2015 IEEE 28th Canadian Con-

- ference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Halifax, NS: IEEE, 2015: 663-668.
- [62] 王晓辉,朱永利,王艳,等. 基于深度学习的电容器介损角在线辨识[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 145-152.
- WANG Xiaohui, ZHU Yongli, WANG Yan, et al. On line identification method of power capacitor dielectric loss angle based on deep learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 145-152.
- [63] 李春耕. 基于同步相量的电容器状态监测与诊断系统[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- LI Chungeng. Monitoring and fault diagnosing system for power capacitors based on synchronized phasors [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [64] PRADHAN A K, CHATTERJEE B, CHAKEAVORTI S. Estimation of dielectric dissipation factor of cellulosic parts in oil-

paper insulation by frequency domain spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2720-2729.

作者简介:



姚 芳

姚 芳(1972—),女,天津人,教授,博士,主要研究方向为电器可靠性及其检测技术(E-mail: yaofang@hebut.edu.cn);

王 槟(1993—),女,天津人,硕士研究生,主要研究方向为电器可靠性及其检测技术(E-mail: blazer_b@163.com);

唐圣学(1976—),男,天津人,教授,博士,主要研究方向为电力电子(E-mail: tsx@hebut.edu.cn)。

Review of online condition monitoring methods for DC-link capacitor

YAO Fang^{1,2}, WANG Bing^{1,2}, TANG Shengxue^{1,2}, HUANG Kai^{1,2}, LI Zhigang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: DC-link capacitor is one of the key components in power electronic converter, its reliability will affect the reliability of the whole system. Condition monitoring is an effective method to estimate the health condition of capacitors. The health state parameters and performance state parameters of capacitors are comprehensively analyzed. The online condition monitoring methods of capacitors are classified into four categories: method based on sensor, method based on signal injection, method based on circuit model and method based on intelligent monitoring. The principle and means of each method are introduced, and their advantages and disadvantages are compared. Secondly, statistical analysis of monitored objects and monitored parameters based on research results is carried out. Finally, the following research direction of capacitor condition monitoring is proposed.

Key words: DC-link capacitor; capacitance; condition monitoring; ESR; parameter identification

表 1 DC-link 电容器状态监测方法特点及应用

Table 1 Characteristics and applications of DC-link capacitor condition monitoring methods

方法	性能参数	方法特点	技术局限	健康参数	相对误差	文献	应用
传感器法	T_c 、 i_c 、 Δv_c	建立 ESR 数据库，离线监测与在线监测对比		ESR	10	[14]	静止变流器
	i_c 、 Δv_c	根据平均损耗和纹波电流获取电容参数	需对电容器串接测量设备，影响变流器运行	ESR	—	[15]	不间断电源
	i_c 、 Δv_c			ESR	—	[16]	BOOST 电路
	T 、 t	提出一种 AEC 的 ESR 与 T 、 t 的线性逆模型		ESR	—	[17]	开关电源
	i_c 、 Δv_c	根据纹波电压和纹波电流获取频域电容参数		ESR	1	[18]	功率变换器
	Δv_{ic} 、 Δi_{ic}	采用 BPF 滤波获取中频域电容参数		ESR	—	[19]	PWM 电路
	v_c 、 i_c	利用开关频率电压电流获取电容参数		ESR	4	[20]	BOOST 电路
	Δv_{out}	利用新型 RC 传感器获取电容器参数		ESR	6	[21]	DC/DC 变换器
注入法	i_c 、 v_c	注入低于线路频率的电流，需要 RLS 算法处理		C	1	[22]	AC/DC/AC 变换器
	i_c 、 v_c	注入可控的交流电流分量，需要 RLS 算法处理		ESR	1	[23]	AC/DC/AC 变换器
	i_c 、 v_c	注入低阶奇数次谐波电流，需要 RLS 算法处理		C	1	[24]	AC/DC/AC 变换器
	i_c 、 v_c	注入低频电流纹波，建立了 AEC 的失效判据	需注入特定频率的电流或电压，造成系统运行负担	低频阻抗	0.64	[25]	DC/DC 变换器
	i_c 、 v_c	注入奇数次谐波电流，需要 LMS 算法处理		ESR, C	3.62	[26]	光伏 DC/AC 变换
	I_{as} 、 e_c 、 v_c	在电机停转时注入恒占空比电压		ESR, C	5	[27–28]	DC/AC 变换器
	i_c 、 v_c	注入低于线路频率的电压，需要滤波处理		C	0.15	[29]	AC/DC/AC 变换器
	i_c 、 v_c	注入受控的交流电压/电流		C	—	[30]	AC/DC 变换器
电路模型法	v_c	低温的电容器健康状态监测，适用范围广		ESR, C	2.75	[31]	AC/DC/AC 变换器
	i_L 、 v_c	基于混合模型获取参数，数据处理复杂		ESR	5	[32]	BUCK 电路
	v_c	监测电容电压，用 LMS 算法处理获取参数		C	2.5	[33]	铁路列车
	v_c	对纹波电压进行处理获取参数，软件计算复杂		ESR	—	[34]	功率变换器
	V_{in} 、 V_g	提取特定时刻的电容电压代替电流传感器求取电容器健康状态参数，精度很高		ESR, C	3.1	[35]	PFC 变换器
	V_{in} 、 V_g			ESR, C	—	[36]	PFC 变换器
	V_{in} 、 V_g			ESR, C	—	[37]	Buck 变换器
	V_o	需要设计一个隔离放大电路捕捉电压纹波	对电路模型的针对性较强，通用性差；设计及计算过程	ESR, C	—	[38]	CCM 反激变换器
	V_o	通过电压的阶跃响应判定健康状态		电压	—	[39]	Buck 变压器
	v_c 、输出电流	通过电流重构监测电容状态，	非常复杂	C	5	[40]	DC/AC 变换器
	v_c 、输出电流	独立于驱动器运行		ESR, C	3	[41]	DC/AC 变换器
	v_c 、输出电流	设计电容放电电流控制器获取参数		C	2	[42]	DC/AC 变换器
	i_L 、 v_c	对电感电流进行采样获取纹波电流低频分量		C	14.7	[43]	光伏 DC/AC 变换
	i_{pv} 、 v_{pv}	通过零矢量时刻的电压电流计算电容参数		C	1.5	[44]	光伏 DC/AC 变换
	i_L 、 v_c	求取二倍基频的 C		C	2.56	[45]	光伏 DC/AC 变换
	i_{pv} 、 v_{pv}	利用 MPPT 在 CCM 和 DCM 模式获取 ESR		ESR	6.2	[46]	DC/DC 升压变换器
	v_{pv}	利用 PEE 技术，局限于单相并网光伏逆变器		ESR	1	[47]	Boost 变换器
智能监测法	i_L 、 v_c	构建混杂模型，设计复杂，电容监测精度低		ESR, C	5	[48–49]	Buck 变换器
	i_L 、 v_c	考虑环境纹波采用卡尔曼滤波进行参数辨识		ESR, C	5, 10	[50]	不间断电源
				ESR, C	—	[51]	不间断电源
	V_o	采用时域算法，对于 ESR 的监测精度比较高		ESR	11	[52]	开关电源
	i_L 、 Δv_c	采用 EMD 算法，计算复杂，ESR 监测精度高	算法复杂，前期准备工作量大；监测精度问题有提升空间	ESR	5	[53]	Buck 变换器
	电感电压、 I_o	采用遗传算法，对精度影响很大，误差大		ESR, C	14.5	[54]	Buck 变换器
	v_c	采用神经网络训练，硬件成本低，软件要求高，	空间	C	0.2	[55]	功率变换器
	i_c 、 v_c	实际应用可操作性较低，容易产生误差		C	0.5	[56–57]	功率变换器
	i_c 、 v_c	采用模糊逻辑与神经网络算法结合		ESR	4.4	[58]	功率变换器
	v_c 、 V_s	采用自适应神经模糊推理系统，辨识精度高		C	0.3	[59]	功率变换器

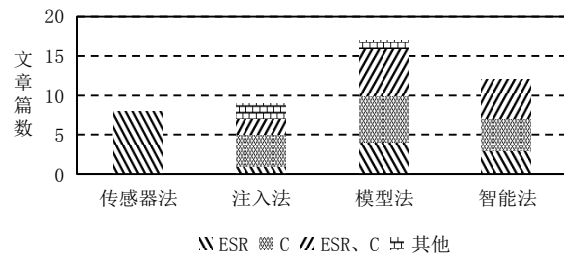


图 A1 DC-link 电容器状态监测成果统计

Fig.A2 Data statistics for DC-link capacitor condition monitoring achievements

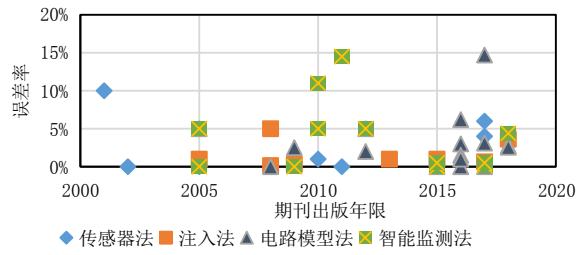


图 A2 DC-link 电容器状态监测成果时间分布及相对误差

Fig.A2 Time distribution and relative error rate of DC-link capacitor condition monitoring achievements