

H桥逆变器电解电容参数性故障特征提取*

王新 赵文昌

(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

摘要: 研究 H 桥逆变器电解电容参数性故障诊断的特征提取问题。传统基波等效分析法是利用基波来寻求电容老化的特征规律,在实际情况下该方法误差较大,可靠性不高。针对这一问题,提出采用小波包频带能量法对故障信号进行特征提取,该方法能够精确提取信号的频带能量变化信息。通过建立 H 桥逆变器仿真模型,模拟电容不同老化程度的故障,用小波包频带能量法提取出电容正常和不同老化程度下的频带能量,构造特征向量,以寻求 H 桥逆变器电容老化时的特征变化规律。仿真结果表明,该方法能够准确提取 H 桥逆变器的电解电容老化故障特征。

关键词: H 桥逆变器;电解电容老化;基波等效分析;小波包频带能量

中图分类号: TM64 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Fault feature extraction of electrolysis capacitor parametric for H-bridge inverter

Wang Xin Zhao Wenchang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The feature extraction of H-bridge inverter electrolytic capacitor parameters fault diagnosis is researched. The capacitor aging characteristics is analyzed by the traditional fundamental equivalent analysis based on the fundamental harmonic. In the actual situation, this method has large error and its reliability is poor. In order to solve the above problem, this paper puts forward to use the wavelet packet frequency band energy method to extract the fault feature. This method can accurately extract the signal band energy changed information. Through building the simulation model of H-bridge inverter to simulate the different capacitance aging fault, the band energy can be extracted under the capacitor normal and varying degrees of aging based on the wavelet packet frequency band energy method, feature vectors are constructed, and H-bridge inverter electrolytic capacitor characteristic change rules are sought as the capacitor aging. Simulation results show that this method can accurately extract the H-bridge inverter electrolytic capacitor aging fault feature.

Keywords: H-bridge inverter; electrolysis capacitor aging; fundamental equivalent analysis; wavelet packet frequency band energy

1 引言

目前,在石油、钢铁、冶金、化工等行业中,级联式变频器广泛地应用于驱动风机、泵类及各种大型机械,已成为现代社会节能、提高生产自动化水平、改造传统工业、推动技术进步的主要手段之一^[1-2]。级联式变频器每相由多个低压 H 桥逆变器串联组成,各 H 桥逆变器由一个副边多绕组的移相变压器供电。级联式变频器相对于传统的两电平变频器,主电路的功率器件增多了,因此其故障的可能性也大大增加,故障问题也会越来越明显^[3]。级联式变频器电

解电容老化故障对变频器的输出电压、电流影响很小,因而不容易被发现。若不能及时的诊断出该隐性故障,将会形成很大的故障隐患,给安全生产带来威胁^[4]。然而,目前对于级联式变频器的 H 桥逆变器电解电容老化故障诊断的研究比较少,大多数是针对主电路拓扑结构^[5-8]、控制策略^[9-10]以及基于智能算法的故障诊断^[11-13]等研究,而对元器件劣化(如电解电容老化)情况下的故障特征研究很少^[14-19],因此迫切需要提出级联式变频器性能劣化情况下故障特征提取方法,并获取其故障特征。

级联式变频器中的 H 桥逆变器都配有滤波电解电容,

收稿日期:2015-11

* 基金项目:国家自然科学基金(61403129)、河南省科技攻关(142102210048)资助项目

其功能主要是支撑功率单元母线电压及吸收逆变器的电压纹波。为了将母线电压纹波控制在一定范围内,电解电容的容量下限都有一定要求。电解电容长期在高温或大的纹波电流环境下工作,会导致电容里面的电解液会缓慢泄露或纹波电流超过电解电容的额定纹波电流,最终导致电解电容老化,容量变小,从而影响变频器的性能指标。本文针对 H 桥逆变器的电解电容的老化故障特征提取问题,分析了传统基波等效分析法的不足,提出基于小波包频带能量法的母线电压信号分析方法,获取频带能量分布图,准确提取出 H 桥逆变器电解电容老化故障情况下的故障特征。

2 H 桥逆变器的建模

本文以 6 kV 级联式变频器为研究对象,它有 15 个 H 桥逆变器功率单元组成,每相由 5 个额定电压为 690 V 的低压 H 桥逆变器功率单元串联组成。每个功率单元承受系统 1/5 的输出相电压和全部的输出相电流,而功率单元的设计功率是 1/15 的输出总功率,图 1 为 A 相一个 H 桥逆变器功率单元原理图。

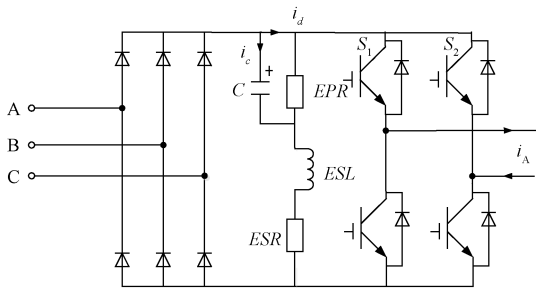


图 1 H 桥逆变器的原理

电解电容器在工作过程中,会缓慢地发生介电击穿现象,电流会由电容器的一端经过其绝缘层流向电容器的另一端。介电击穿的结果往往是灾难性的,会导致短路或者开路故障。电解电容器本身存在许多非理想特性,可以通过附加寄生元件来表征,如图 2 所示是电解电容器的等效电路模型。ESR 为其等效串联电阻, C 为等效串联电容, ESL 为等效串联电感, EPR 为电容器等效并联电阻。由于在实际情况下,这些特征参数的影响不容忽视,所以仿真时均考虑在内。

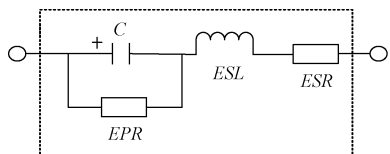


图 2 电解电容等效电路模型

3 H 桥逆变器电解电容故障特征提取方法

3.1 基波等效分析法

传统的基波等效分析法,是在假定电解电容能吸收大

部分的电流纹波的条件,只考虑 H 桥逆变器输出电压和输出电流的基波成分,分析基波成分对特征参数纹波电压的影响。本文假设分析时的调制比为 M , ω_0 为输出电流角频率, φ 为功率因数角。

根据图 1 所示, H 桥逆变器的输入电流可以表示为:

$$i_d = (S_1 - S_2) i_A \quad (1)$$

根据文献[14], H 桥逆变器的开关函数 S_1 、 S_2 的表达式为:

$$\begin{cases} S_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{2} M \sin(\omega_0 t) \right) \\ S_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} M \sin(\omega_0 t) \right) \end{cases} \quad (2)$$

其中 A 相输出电流的表达式为:

$$i_A = \sqrt{2} I_N \sin(\omega_0 t - \varphi) \quad (3)$$

将式(2)和(3)代入式(1),可得:

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{2} I_N \sin(\omega_0 t - \varphi) M \sin(\omega_0 t) \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} M I_N [\cos\varphi - \cos(2\omega_0 t - \varphi)] \end{aligned} \quad (4)$$

因此可以得出输入电容电流 i_c 的表达式为:

$$i_c = -\frac{\sqrt{2}}{2} M I_N \cos(2\omega_0 t - \varphi) \quad (5)$$

根据电解电容两端电压 v_c 和电流 i_c 的关系:

$$dv_c = \frac{i_c dt}{C} \quad (6)$$

对 i_c 正半波积分得到纹波电压信号,由于通常纹波电压值定义为峰峰值的一半,所以纹波电压值为:

$$v_c = \frac{\sqrt{2} M I_N}{4\omega_0 C} \quad (7)$$

由纹波电压值的计算公式(7)可知,传统基波等效分析法只是从基波成分来分析,通过电容老化程度推断出纹波电压的变化程度,以此提取电容老化的故障特征。但是,此方法忽略了谐波的影响,以及实际情况中 ESR 的值随着电容老化程度的增大而增大的现象。在信号扰动比较大的情况下,误差会较大,可靠性不高。

3.2 基于小波包频带能量的故障特征提取方法

小波包分析是一种精细的信号分析方法,对频带进行多层次划分,而且能够根据信号的特征,自适应的选择相应频带,以此与信号频谱匹配,具有较高的时频分辨率,对信号具有更强的分析能力。小波包频带能量法就是以频带能量为元素构造其特征向量,做出频带能量图,直观的反应信号的故障特征。

当 H 桥逆变器的电解电容发生老化故障时,母线电压信号会有较大的变化。母线电压信号的各项带能量有着丰富的特征故障信息,频带能量的变化就代表了一种故障特征。由于纹波电压信号中直流分量很大,为了突出故障特征,对信号进行小波包分解前,需要滤除直流分量。故障特征提取步骤如下。

1)信号预处理。首先对母线电压采样信号进行处理,滤除直流分量。

2)进行小波包分解,并求取各频带信号的能量。本文采用4层小波包分解, S_{ij} 为第*i*层的第*j*个节点,其中*i*=0,1,2,3,4;*j*=0,1,2,3,...,15。设 S_{ij} (*j*=0,1,2,3,...,15)对应的能量为 E_{ij} (*j*=0,1,2,3,...,15),则有:

$$E_{ij} = \sum_{j=0}^{15} |S_{i,j}|^2 \tag{8}$$

3)构造频带特征向量。当H桥逆变器电解电容发生老化故障时,会对各频带内的信号能量有影响,在此,以频带能量为元素可以构造特征向量。特征向量*T*构造如下:

$$\mathbf{T} = [E_{40}, E_{41}, E_{42}, \dots, E_{415}] \tag{9}$$

为了在应用上通用方便化,采取归一化相对能量检测,对特征向量进行能量归一化处理,即:

$$\overline{E}_{ij} = \frac{E_{ij}}{\sum_{j=0}^{15} E_{ij}} \tag{10}$$

得到归一化后的特征向量 $\overline{\mathbf{T}}$

$$\overline{\mathbf{T}} = [\overline{E}_{40}, \overline{E}_{41}, \overline{E}_{42}, \dots, \overline{E}_{415}] \tag{11}$$

根据特征向量 $\overline{\mathbf{T}}$ 可以作出各个频带分解信号相对能量的直方图,该直方图称为频带能量图。

4 电解电容参数性故障仿真与分析

本文利用 MATLAB/Simulink 搭建了一个 H 桥逆变器功率单元仿真平台,主要由三相交流电压源、变压器、三相不可控整流桥、直流母线滤波电解电容、H 桥逆变器、RL 负载等部分组成。三相交流电压源的额定输入线电压为 720 V,等效串联电阻 ESR 初始值为 0.5 Ω,变化范围为 0.5~2 Ω。RL 负载的电阻值为 15 Ω,电感值为 20 mH。通过改变滤波电容容量大小来模拟电容老化故障,电容的额定初始值是 5.21 mF。为了提取电容老化的故障特征,验证小波包频带能量法在提取 H 桥逆变器电容老化故障特征的有效性,分别取电容正常(5.21 mF)和老化程度为 10%(4.68 mF),20%(4.17 mF),30%(3.65 mF)等 4 组数据。采样频率取 2 000 Hz,选取的小波基为 db4,小波包分解层数为 4 层,共 16 个频带,分别取电容正常和不同老化程度下的第 1~8 个特征频带的频带能量,即 $\overline{E}_{40} \sim \overline{E}_{47}$,得到其频带能量值如表 1 所示。第 9~16 个特征频带的频带能量,即 $\overline{E}_{48} \sim \overline{E}_{415}$,主要是干扰信息,这里不再列出。同时,根据第 1~8 个特征频带的能量值,作出其频带能量图如图 3 所示。

根据表 1 可知,正常情况下纹波电压的主要频率成分集中在特征频带 1、2 和 4 上,即 0~62.5 Hz、62.5~125 Hz 和 187.5~250 Hz,其中频带 2 所占的比重最大即为 34.25%,其次频带 1 所占比重为 15.37%。随着电容老化程度的增大,频带 2 和频带 4 能量值也逐渐增大。以电容老化程度 30% 为例,频带 2 的能量值 \overline{E}_{41} 从 0.342 5 逐渐增大到 0.713 4,为正常情况下的 2.08 倍,频带 4 的能量值

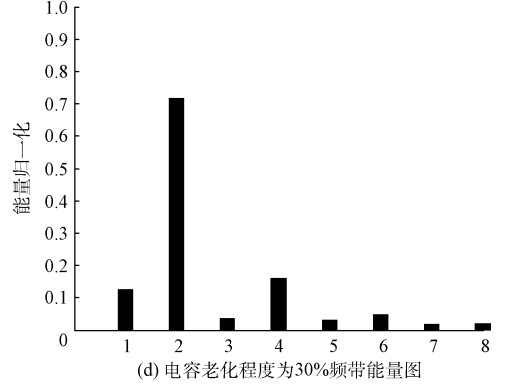
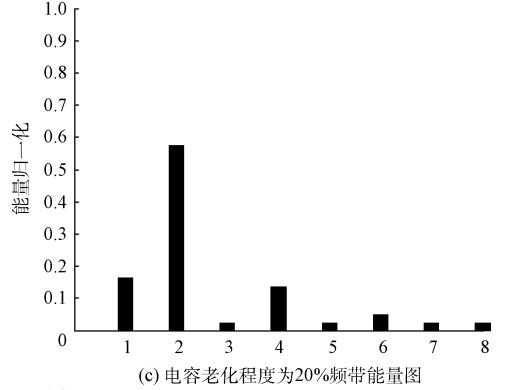
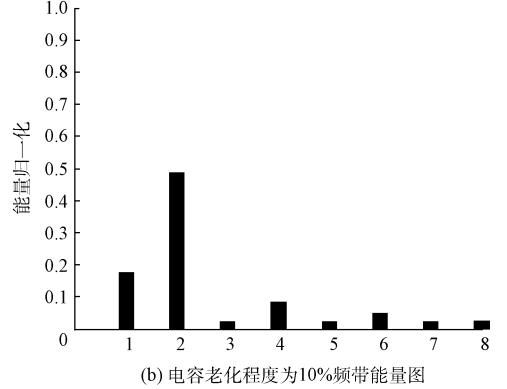
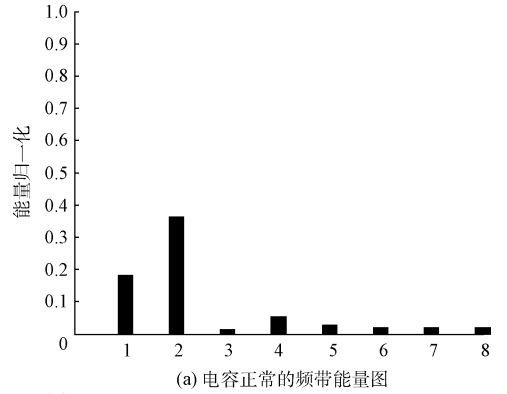


图3 电容正常和不同老化程度下的频带能量图

\overline{E}_{43} 增大到原来的 3.21 倍,而其余的频带相对能量值变化不大。由此可见,通过提取纹波电压信号的频带能量,以频带 2 和 4 的能量作为电解电容老化故障特征,可以准确诊

断出 H 桥逆变器电容老化故障,该方法比传统的基波等效 分析法可靠性高。

表 1 电容正常和不同老化程度下所对应的频带能量

电容老化程度	\overline{E}_{40}	\overline{E}_{41}	\overline{E}_{42}	\overline{E}_{43}	\overline{E}_{44}	\overline{E}_{45}	\overline{E}_{46}	\overline{E}_{47}
正常	0.153 7	0.342 5	0.035 8	0.056 8	0.047 5	0.033 4	0.034 9	0.014 8
10%	0.142 4	0.463 0	0.030 2	0.062 5	0.042 4	0.037 6	0.033 5	0.015 5
20%	0.132 3	0.582 4	0.026 5	0.171 5	0.039 4	0.041 8	0.031 2	0.016 7
30%	0.121 2	0.713 4	0.020 2	0.182 6	0.035 4	0.046 7	0.030 3	0.017 3

5 结 论

针对 H 桥逆变器电解电容老化故障特征提取问题,通过仿真分析,验证了小波包频带能量法在提取电解电容老化故障特征的有效性。仿真结果表明:纹波电压信号中的频带 62.5~125 Hz 和 187.5~250 Hz 所占比重较大,随着老化程度的增大,二者均呈明显增大趋势;小波包频带能量法能够准确提取出故障信号的特征频带能量变化规律,可以克服基波等效分析法只利用基波成分来提取故障特征时可靠性不足的缺点。

参 考 文 献

- [1] 韩智玲,任兆华,钱鸣,等. H 桥级联型多电平高压变频器的断路故障分析[J]. 电气传动, 2006, 36(7): 19-21.
- [2] 于泳,蒋生成,杨荣峰等. 变频器 IGBT 开路故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 30-35.
- [3] 汤清泉,颜世超,卢松升,等. 三电平逆变器的功率管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 26-32.
- [4] 王新,徐娟. 基于小波包神经网络的级联式变频器故障诊断仿真研究[J]. 河南理工大学学报, 2012, 31(6): 706-711.
- [5] 夏华,李磊,薛媛媛,等. 一种新型的混合级联多电平逆变器[J]. 电源学报, 2013(5): 37-41.
- [6] 李和明,王毅,石新春,等. 混合级联型多电平变频器拓扑结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 127-132.
- [7] 朱思国,欧阳红林,朱英浩,等. H 桥级联型逆变器的迭代谐波消除方法[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 318-324.
- [8] 杨晓冬,王崇林,史丽萍,等. H 桥逆变器 IGBT 开路故障诊断方法研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 28(1): 207-209.
- [9] 罗德荣,陈琼,秦卓欣,等. 单元级联型变频器 SPWM 控制算法研究与实现[J]. 电力电子技术, 2010, 44(7): 81-83.
- [10] 朱丽媛,王英. 基于 MATLAB 的级联型高压变频器的建模与仿真[J]. 电机与控制应用, 2012, 39(4): 51-56.

- [11] SONG L W, PENG M F, TIAN CH L. Analog circuit diagnosis based on particle swarm optimization radial basis function network MENDES A M S, CARDOSO A J M, SARAIVA E S. Voltage source inverter fault diagnosis in variable speed AC drivers by park's vector approach [A]. The Seventh international Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. IEEE Conference Publication, 1998, 538-543.
- [12] CRUZ S M A, CARDOSO A J M. Rotor cage fault diagnosis in three phase induction motors by extended park's vector approach[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000, 28(4): 289-299.
- [13] VENT P, LAHYANI A, GRELLET G et al. Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method [J]. European Physical Journal: Applied Physics, EDP Sciences, 1999, 5(1): 71-83.
- [14] 王爱玲,秦晓明,郭锐东,等. H 桥逆变器输入电压纹波分析及最小输入电容设计[J]. 电气传动, 2014, 44(9): 28-30.
- [15] 尚永爽,王怡苹,刘勇,等. 开关电源的故障预测及电解电容器退化研究[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 102-104.
- [16] 刘洁,黄海宏,王海欣,等. 混合级联多电平高压有源电力滤波器预研[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, (29): 408-414.
- [17] 王蒙蒙,汤钰鹏. 三电平逆变器载波 PWM 方法的研究[J]. 电子测量技术, 2010, 33(33): 27-30.
- [18] 柯程虎,张辉. 小功率单相光伏并网逆变器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(12): 2866-2873.
- [19] 张发生,吴舒辞. 由 SA8281 为主控的 SPWM 逆变器[J]. 国外电子测量技术, 2004, 23(1): 23-25.

作者简介

王新, 1967 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为故障诊断、电气传动、智能仪器仪表和微机控制等。
E-mail: wangxin@hpu.edu.cn.

赵文昌(通讯作者), 1989 年出生, 工学硕士, 主要研究方向为级联式变频器故障诊断。
E-mail: 1096281928@qq.com