

基于功率守恒理论的有载分接开关燃弧损耗在线检测研究

宋冬冬^{1,2}, 张丽红², 马玉泉², 刘西印², 吕雪姣²

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;

2. 河北科技师范学院机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 有载分接开关(OLTC)切换电弧会影响触头寿命,需要对其工况进行检测。综合 dq 坐标变换、基波分量提取以及小波算法,本文提出基于功率守恒理论的 OLTC 燃弧损耗在线检测方法。在理清研究思路的基础上,建立了自耦调压变压器的等效原理图及等效电路,并依据功率守恒理论,推导了切换过程功率方程。利用基波分量提取算法计算了变压器激磁参数,联合 Mayr 电弧模型建立了 OLTC 仿真电路。利用 dq 坐标变换算法得到系统各部分有功功率,计算了 9 种工况下开关燃弧损耗数据。搭建了基于交流接触器的 OLTC 样机并利用 dSPACE 平台完成 3 种负载工况的燃弧能量在线计算。在考虑测量与计算误差下,仿真与实测结果表明,燃弧能量计算误差与燃弧过程剧烈程度呈负相关性。不同工况之间,仿真计算结果与实测计算结果均具备可辨识度,且数值随工况变化而改变,可作为设备切换工况的判据。该特性对其他开关结构具有适用性,验证了该研究是有效的。本工作以期开发 OLTC 在线触头检测系统提供理论基础。

关键词: 有载分接开关; 电弧能量; 在线状态监测; dq 坐标变换; 信号处理

DOI: 10.12067/ATEEE1910013

文章编号: 1003-3076(2020)09-0056-09

中图分类号: TM56

1 引言

配网电能质量问题随着电源结构与负荷的多样性愈加显现,在 10~35 kV 等级,带有载分接开关(On-Load Tap Changer, OLTC)的调压变压器成为基础性配置,OLTC 作为附属设备,需要对其离网维护和检修,牺牲了供电可靠性。故 OLTC 在线状态监测领域成为研究热点。文献[1-3]利用振动传感器采集 OLTC 工作过程振动信号,间接获得触头松动等故障隐患信息;文献[4,5]利用了自适应形态学滤波和 DBSCAN 聚类算法,分析真空式和油浸式 OLTC 切换振动特性异同;文献[6]利用独立成分分析算法分析 OLTC 切换过程的振动信号;文献[7,8]分别利用扭矩传感器和旋转角度传感器测量 OLTC 驱动电机轴扭矩和转角,得到齿轮卡涩等故障信息;文献[9]提出瞬态微分计算 OLTC 切换开关电弧能量的方法并进行验证。此外,关于 OLTC 在线监测研究还包括光测量、温度测量、热成像等^[10-13]。

现有 OLTC 在线监测技术多利用电气量或非电气量传感元件,以非介入方式获取 OLTC 在工作过程中的声、光、振动等状态信号,系统结构复杂且信号易受干扰而失真。目前针对电弧参数测量的方法和研究背景较少。本文基于功率守恒原理,研究了燃弧能量在线测量计算方法。该工作希望为下一步开发 OLTC 在线监测系统提供理论依据。

2 研究思路及分析过程

2.1 研究思路

本研究思路如图 1 所示。整体结构包括采集存储、算法、计算以及专家数据库 4 个单元。首先采集变压器系统相关电流和电压信号,完成 dq 坐标变换及切换关键点辨识,得到 d 轴有功分量参数及(半)桥接区间信息。利用系统有功功率守恒方程得到燃弧损耗数据。该数据可作为后续专家系统数据库的数据源或对比数据,以判断切换开关触头工况及负载变化情况。

收稿日期: 2019-10-30

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(QN2018211)

作者简介: 宋冬冬(1981-),男,河北籍,讲师,博士研究生,研究方向为新能源发电技术、智能检测技术;
张丽红(1971-),女,河北籍,讲师,硕士,研究方向为电力电子技术及应用。

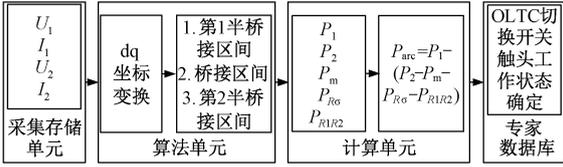


图1 研究路线结构图
Fig.1 Research route structure

图1中, U_1 、 I_1 、 U_2 、 I_2 分别为变压器输入和负载的电压、电流。 P_1 为变压器输入功率、 P_2 为负载消耗功率、 P_m 为变压器激磁电阻消耗功率、 $P_{R\sigma}$ 为变压器直流电阻消耗功率、 P_{R1R2} 为 OLTC 过渡电阻损耗。此外,还包括切换开关接触电阻损耗 $P_{contact}$ 、线路电阻损耗 P_{line} 以及切换开关燃弧损耗 P_{arc} 。在变压器系统中,依据功率守恒有:

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{R\sigma} + P_{R1R2} + P_{contact} + P_{line} + P_{arc} \quad (1)$$

因 P_{line} 和 $P_{contact}$ 较小,可忽略不计。电弧等离子体具有负阻特性,用可变电阻模型描述,故损耗可写为有功功率,具有合理性。理论上通过式(1)能得到 OLTC 切换过程中的 P_{arc} 数值,但需结合设备切换过程,获取变压器本体以及 OLTC 过渡电阻损耗后,方可求得燃弧损耗值。以上所涉参数均属于变压器调压系统,坐标变换参考电压一致,满足 dq 变换前提。本研究主要完成采集存储、算法和计算三个部分,专家系统部分暂不涉及。

2.2 分析过程

本研究所针对的 OLTC 设备拓扑结构及工作时序如图2所示。

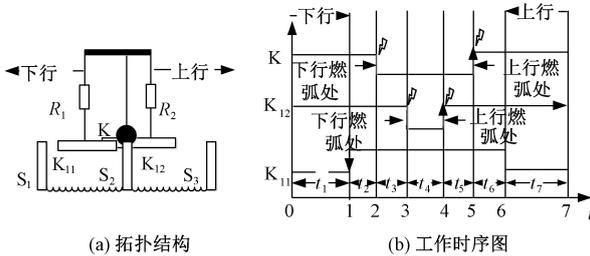


图2 OLTC 拓扑结构及工作时序
Fig.2 Topology structure and working sequence of OLTC

S 为变压器分接抽头, K 为主通断触头, K_{11} 和 K_{12} 为过渡触头, R 为过渡电阻。常态下, K、 K_{12} 均与 S_2 抽头连接, K_{11} 悬空, 按上行或下行时序完成抽头切换。图2(b)中标记了 K 和 K_{12} 的燃弧位置。为便于分析在线检测原理及思路,将原设备结构等效为如图3所示仿真模型及切换时序。

模型使用了5个开关 $K_1 \sim K_5$ 代替原设备 K、 K_{11}

和 K_{12} 。为保证工作的等效性,依据原设备手册,设定模型工作时序如图3(b)所示。 $K_1 \sim K_5$ 表示5个机械开关动作时序: $t_1 = 0.0199$ s, $t_2 = 0.015$ s, $t_3 = 0.0301$ s, $t_4 = 0.0259$ s, $t_5 = 0.026$ s, $t_6 = 0.017$ s, $t_7 = 0.020$ s。高电平为闭合,低电平为断开^[14]。模型使用了自耦变压器, w_1 、 w_2 分别为串联绕组和公共绕组。A、B 分别为两抽头, U_1 为电源电压。 V_1 、 V_2 分别为测量变压器级绕组电压和负载电压, A_1 、 A_2 分别为测量系统注入变压器电流和负载电流。

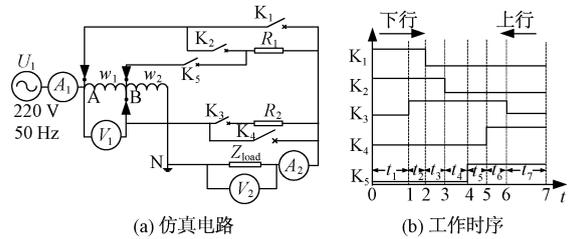


图3 仿真电路及工作时序

Fig.3 Diagram of simulation circuit and control sequence

式(1)中各功率变量分布在切换过程中,为得到各变量数值,需分析切换等效电路,获取各阶段功率损耗分布,再将各阶段数值加和,得到整个切换过程的功率损耗,进而可得到燃弧损耗。故依据图3,建立整个切换过程等效电路,如图4所示。其中, $R_{1/2}$ 为过渡电阻并联值, Z_m 、 $Z_{w1\sigma}$ 、 $Z_{w2\sigma}$ 分别为变压器激磁阻抗、 w_1 漏阻抗、 w_2 折算漏阻抗, I_1 、 I_0 、 I_{w1} 、 I_{w2} 、 I_w 、 I_{R1} 、 I_{R2} 、 $I_{1/2}$ 、 I_{load} 分别为总电流、激磁电流、 w_1 电流、 w_2 电流、总绕组电流、 R_1 电流、 R_2 电流、并联过渡电阻电流和负载电流。

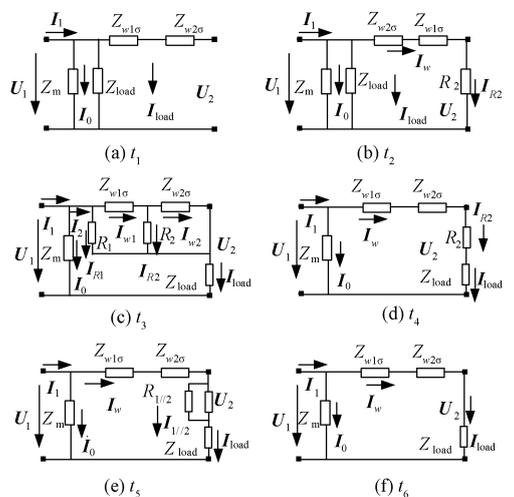


图4 模型等效电路图

Fig.4 Equivalent circuit diagram

令电源 u_1 输出功率为:

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = u_{d1}i_{d1} + u_{q1}i_{q1} + j(u_{q1}i_{d1} - u_{d1}i_{q1}) \quad (2)$$

负载 Z_{load} 消耗的功率为:

$$S_2 = P_2 + jQ_2 = u_{d2}i_{d2} + u_{q2}i_{q2} + j(u_{q2}i_{d2} - u_{d2}i_{q2}) \quad (3)$$

式中, Q_1 、 Q_2 分别为变压器系统和负载的无功功率; u_{d1} 、 i_{d1} 、 u_{q1} 、 i_{q1} 分别为电源电压 u_1 和电流 i_1 对应的 dq 轴分量; u_{d2} 、 i_{d2} 、 u_{q2} 、 i_{q2} 分别为负载电压 u_{load} 和电流 i_{load} 对应的 dq 轴分量。令变压器级绕组电压为 u_{step} , 变压器直流电阻为 R_σ , 变压器激磁阻抗分别为 R_m 、 X_m , 分接绕组端部电压分别为 u_{w1} 、 u_{w2} 。过渡电阻为 R_1 、 R_2 , 过渡电阻损耗为 P_{R1} 、 P_{R2} 。以上参数中, u_1 、 i_1 、 u_{load} 、 i_{load} 为直接测量参数, 可通过 PT、CT 获得, u_{step} 可通过实测或厂家获得, 其余参数为间接计算参数。结合图 3(b) 时序, 对图 4 分析如下。以获得各阶段功率分布计算公式。

图 4(a) 对应时序 t_1 区间, 回路中损耗只有 P_m :

$$P_m = P_1 - P_2 = u_{d1}^2/R_m \quad (4)$$

式中, P_1 为变压器输入功率; P_2 为负载消耗功率; P_m 为变压器激磁电阻消耗功率。

图 4(b) 对应时序 t_2 区间, 回路中损耗包括 R_m 、 R_σ 及 R_2 :

$$\begin{cases} P_m = u_{d1}^2/R_m \\ P_{R2R\sigma} = P_{R2} + P_{R\sigma} = u_{d1}^2/(R_2 + R_\sigma) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_{R2R\sigma}$ 为 R_2 和 R_σ 损耗之和。

图 4(c) 对应时序 t_3 区间, OLTC 处于桥接状态, 回路中损耗包括 R_m 、 R_σ 以及 R_1 、 R_2 , 因变压器漏抗较小, 故忽略其影响:

$$\begin{cases} P_m = u_{d1}^2/R_m \\ P_{R1R2R\sigma} = P_{R1} + P_{R2} + P_{R\sigma} = u_{d1}^2/R_x - P_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $P_{R1R2R\sigma}$ 为 R_1 、 R_2 及 R_σ 消耗功率之和, 该阶段过渡电阻及变压器直流电阻构成了电阻网络, 其等效电阻为:

$$R_x = R_{load} + R_a + \frac{R_c(R_b + R_{w2\sigma})}{R_a + R_b + R_{w2\sigma}} \quad (7)$$

式中, $R_a = \frac{R_1 R_{w1\sigma}}{R_1 + R_2 + R_{w1\sigma}}$, $R_b = \frac{R_2 R_{w1\sigma}}{R_1 + R_2 + R_{w1\sigma}}$, $R_c =$

$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_{w1\sigma}}$ 。 $R_{w1\sigma}$ 、 $R_{w2\sigma}$ 分别为两绕组直流电阻,

且有 $R_{w1\sigma} : R_{w2\sigma} = 1 : 1$ 。

图 4(d) 对应时序 t_4 区间, OLTC 为 R_2 半桥接

状态, 回路中损耗包括 R_m 、 R_σ 及 R_2 :

$$\begin{cases} P_m = u_{d1}^2/R_m \\ P_{R2R\sigma} = P_{R2} + P_{R\sigma} = u_{d1}^2/(R_2 + R_\sigma + R_{load}) - P_2 \end{cases} \quad (8)$$

图 4(e) 对应时序 t_5 区间, 回路中损耗包括 R_m 、 R_σ 及 $R_{1/2}$:

$$\begin{cases} P_m = u_{d1}^2/R_m \\ P_{R1//R2R\sigma} = P_{R1//R2} + P_{R\sigma} \\ = u_{d1}^2/(R_{1/2} + R_\sigma + R_{load}) - P_2 \end{cases} \quad (9)$$

图 4(f) 对应时序 t_6 区间, 回路中仅有 R_m 、 R_σ 损耗, 与时序图 t_7 区间损耗一致:

$$\begin{cases} P_m = u_{d1}^2/R_m \\ P_{R\sigma} = u_{d1}^2/(R_\sigma + R_{load}) - P_2 \end{cases} \quad (10)$$

依据式(1)可得:

$$P_{loss} = P_1 - P_2 = P_m + P_{R\sigma} + P_{R1R2} + P_{arc} \quad (11)$$

式中, P_{loss} 为调压变压器系统总损耗功率; P_m 、 $P_{R\sigma}$ 、 P_{R1R2} 均等效为切换期间的总损耗; P_{arc} 为 OLTC 切换开关电弧功率, 即:

$$P_{arc} = P_1 - P_2 - P_m - P_{R\sigma} - P_{R1R2} \quad (12)$$

式(12)中, P_1 和 P_2 可通过对采样信号计算获得, 其余三项功率损耗, 均为各阶段计算值加和后的结果, 可利用式(2)~式(10)计算得到。

3 仿真研究

3.1 建模分析

(1) 变压器模型建立。为保证仿真与后续实测的一致性, 对实测所用自耦变压器进行了空载试验和短路试验, 以获得激磁参数和漏阻抗参数。测试波形存在谐波分量, 利用了傅式基波分量提取算法对波形进行滤波^[15], 通过对谱线的优化, 得到基波谱线参数, 提高了计算精度。如图 5 所示, 为空载电流原信号与基波分量信号。

利用均方相对误差计算提取精度^[16]

$$\varepsilon_{curr}^2 = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \frac{|i(t_n) - i_c(t_n)|^2}{i(t_n)^2} \quad (13)$$

式中, L 为信号长度; $i(t_n)$ 、 $i_c(t_n)$ 分别为原信号与计算信号; $t_n = nT_s$ ($n=1, 2, 3, \dots, L$), T_s 为采样周期。该式可描述基波分量与原信号的相对偏差, 为 $8.93E-2$ 。在此基础上, 对基波数据进行 dq 分解, 计算变压器空载下激磁阻抗参数, 根据文献[17]得:

$$\frac{u_{d1} + ju_{q1}}{R_m + jX_m} = i_{d1} + ji_{q1} \quad (14)$$

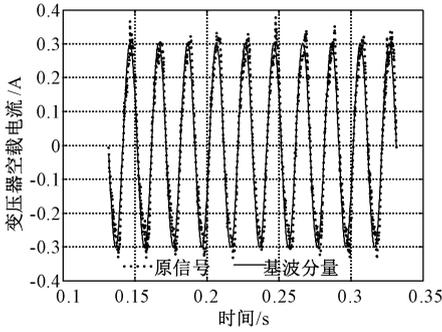


图5 变压器空载测试信号与滤波信号

Fig.5 Transformer no-load test signal and filter signal

整理得:

$$R_m = BX_m \quad (15)$$

式中, $A = \frac{i_{d1}}{i_{q1}}$, $B = \frac{u_{q1} + Au_{d1}}{Au_{q1} - u_{d1}}$, $X_m = \frac{u_{q1} + Bu_{d1}}{i_{d1}(B^2 + 1)}$, u_{d1} , u_{q1} , i_{d1} , i_{q1} 分别为系统电压、电流的有功和无功分量。经计算 $R_m = 1\ 210\ \Omega$, $X_m = 61.89\ \Omega$, $R_\sigma \approx 1 \sim 2\ \Omega$ 。

(2) 开关模型建立。为实现电弧损耗的仿真计算,需建立电弧开关模型。通过文献[18]可知,黑盒电弧模型适于电路仿真且便于求解。因条件所限,无真实 OLTC 设备,故采用交流接触器(AC Contactor, ACC)作为建模对象。考虑到实测电流较小,利用了 Mayr 模型描述燃弧过程,燃弧介质为空气。因开关开断相位的差异决定了燃弧过程的差异。为保证模型参数的有效性,实测了 ACC 开断波形并选取了三个典型开断相位数据进行了电弧模型参数的非线性最小二乘拟合,结果如表 1 所示^[19]。 g_m 为电弧电导, P_0 为耗散功率常数, τ_m 为时间常数。对应三个开断相位的拟合结果如图 6 所示。

表 1 电弧模型参数设置

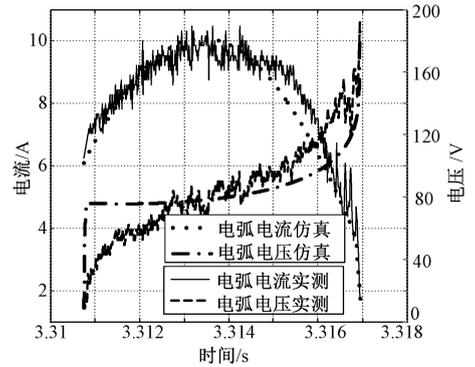
Tab.1 Setting of arc model parameters

序号	开断相位	τ_m/s	P_0/W	g_m/S
1	30°开断	100e-6	1 500	1e3
2	60°开断	10e-6	3 000	1e3
3	90°开断	20e-6	4 000	1e3

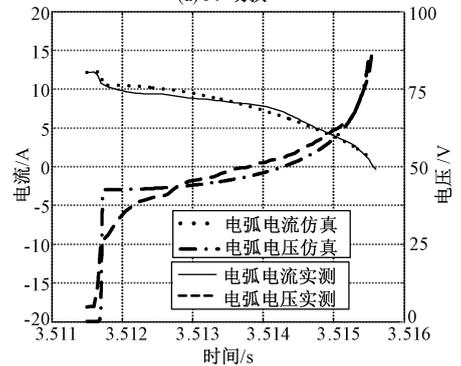
利用该模型替换图 3(a) 下行切换的 K_1 、 K_2 开关和上行切换的 K_4 、 K_5 开关,其他开关均设定为理想无弧开关。

3.2 仿真结果

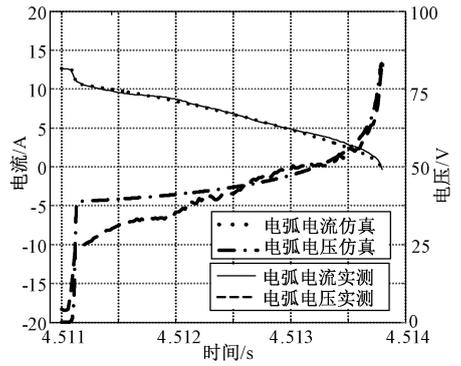
对表 1 中三组电弧模型参数下的不同负载进行了 9 种仿真工况的计算,并依据式(2)~式(10)完成功率分布计算。负载分别为 $R = 25.5\ \Omega$, $C = 187.5\ \mu F$, $L = 8.6\ mH$,组成阻性、阻容性和阻感性。



(a) 30°切换



(b) 60°切换



(c) 90°切换

图 6 实测电弧波形与 Mayr 拟合波形

Fig.6 Tested arc waveform and fitted waveform by Mayr

以下行切换为例,设置步长为 $50\ \mu s$,过渡电阻为 $10\ \Omega$, $u_{w1} = u_{w2} = 155\ V$ 。

(1) 阻性负载。以电弧参数 3 为例,得到系统及负载电压、电流 d 轴分量,如图 7(a) 所示。

利用了小波 db6 基函数对系统电流进行了多尺度分析,如图 7(b) 所示。可以确定切换过程关键点位置,连同图 7(a) 分析结果,为后续分阶段计算功率分布提供了保证。

依据式(2)~式(10),结合图 7(a) 中电压、电流数据以及变压器模型参数,对各切换阶段进行了计算,得到 $P_1 - P_2$ 、 P_m 、 $P_{R\sigma}$ 、 P_{R1R2} 和 P_{arc} ,如图 8 所示。

$P_1 - P_2$ 与 $P_m + P_{R\sigma} + P_{R1R2}$ 之差为 P_{arc} ,放大了为图

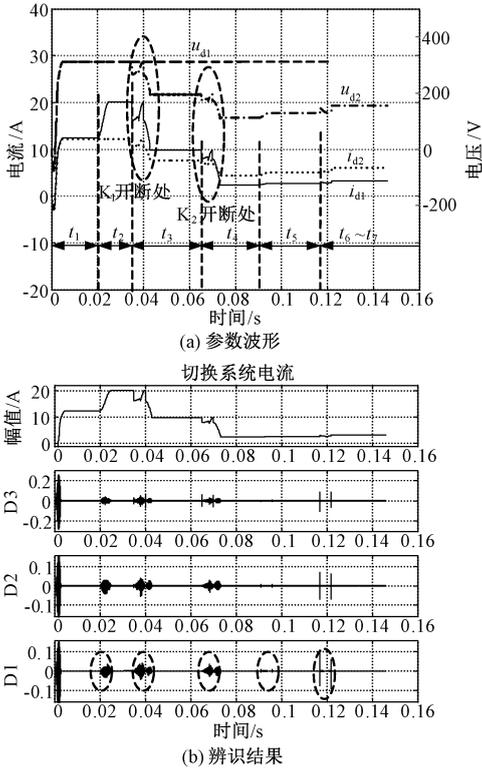


图7 系统电压、电流d轴波形及小波辨识波形(R)
Fig.7 d axis waveform of system voltage, current and wavelet identification (R)

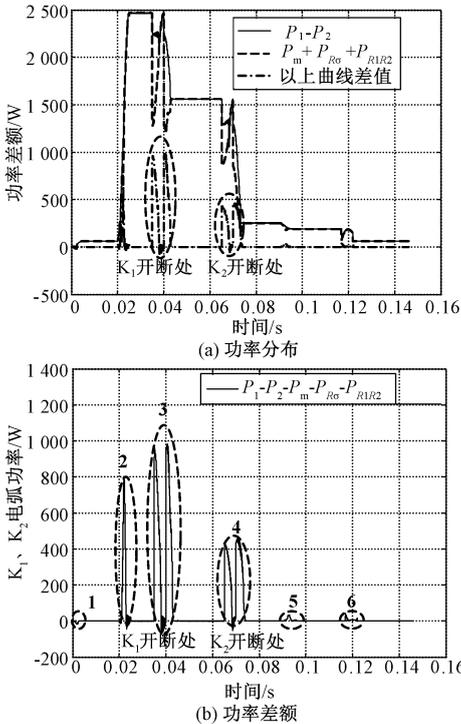


图8 系统功率差额对比仿真波形(R)
Fig.8 Simulation waveform of system power difference(R)

8(b)所示。图8(b)除 K_1 、 K_2 两处燃弧外,其余四处数值应均为零。因各阶段电压和电流信号跳变,锁相过程延时产生误差。为确定本研究的可行性,测量了开关端部电压与导通电流,得到 K_1 、 K_2 实际电弧功率 P_{K1arc} 、 P_{K2arc} 加入对比,如图9所示。 K_1 开断处 P_{K1arc} 略小于 P_{arc} ,波形端部基本重合。 K_2 开断处两曲线基本吻合,具有较好的一致性。

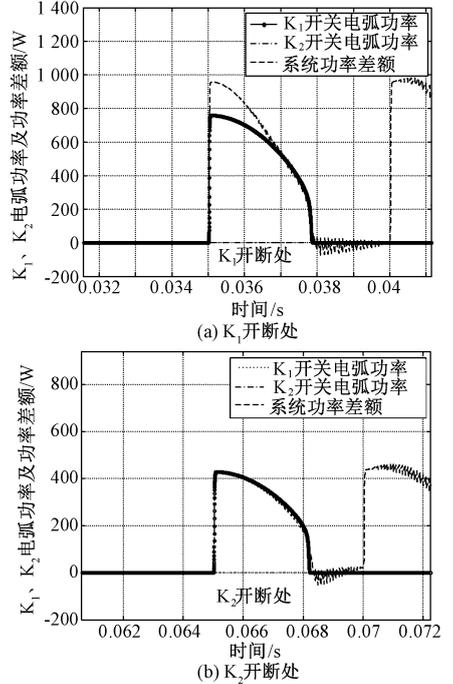


图9 K_1 、 K_2 电弧功率及功率差额图(R)
Fig.9 Waveform of arc power and difference at K_1 、 K_2 (R)

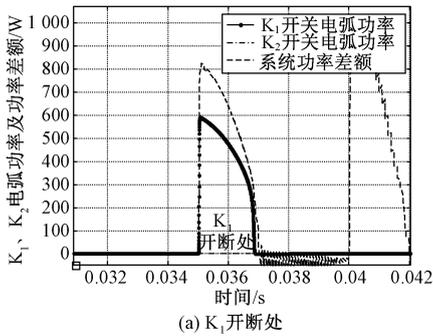
变更负载为RC和RL性,得到图10和图11功率分布计算结果。

(2)RC负载下, K_1 开断处 P_{arc} 较大, K_2 开断处计算值误差较小,同R负载工况。RL负载下, K_1 和 K_2 两处电弧能量计算值与实际值均可较好地吻合。

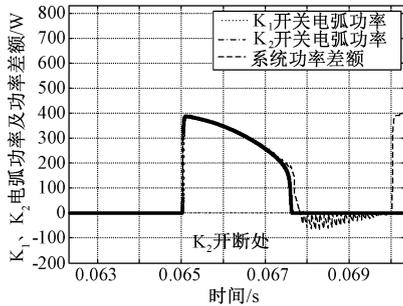
3.3 仿真分析

基于上述9种工况仿真结果,分别将不同电弧模型参数和不同负载下的 K_1 、 K_2 两处开关实际与计算电弧能量汇总于图12中,便于对比分析。 W_{arc} 为计算得到的燃弧能量, W_{K1arc} 、 W_{K2arc} 分别为两处实际燃弧能量。

经分析,随着电弧参数的增大,两开断处燃弧能量计算相对误差呈缩小趋势且在固定电弧参数的RL负载下,燃弧能量计算误差最小。原因在于,较大的燃弧能量在燃弧能量差额计算中占主体,故燃弧过程的剧烈程度与计算误差呈负相关性。另外,



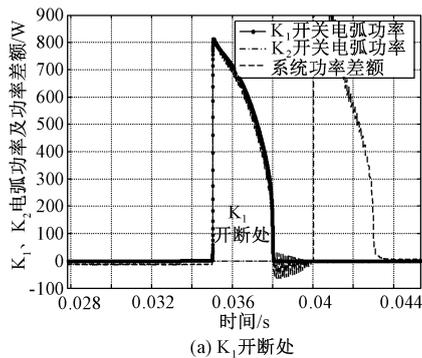
(a) K_1 开断处



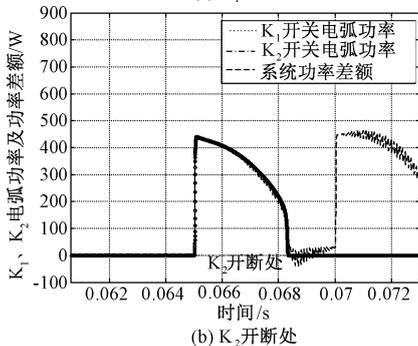
(b) K_2 开断处

图 10 K_1 、 K_2 电弧功率及功率差额图(RC)

Fig.10 Waveform of arc power and difference at K_1 、 K_2 (RC)



(a) K_1 开断处

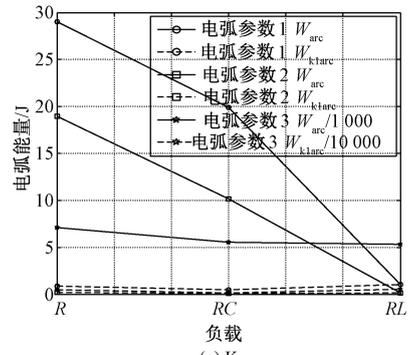


(b) K_2 开断处

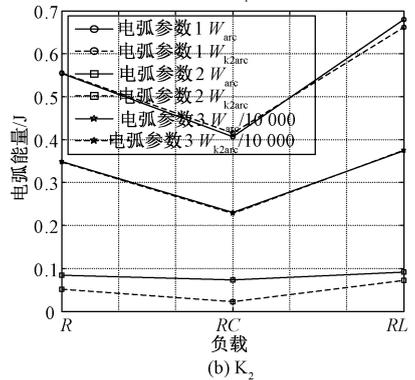
图 11 K_1 、 K_2 电弧功率与计算功率差额(RL)

Fig.11 Waveform of arc power and difference at K_1 、 K_2 (RL)

相同负载不同电弧参数及相同电弧参数不同负载下,两开断处燃弧能量计算值均具备可鉴别性,且受电弧参数及负载变化而改变。



(a) K_1



(b) K_2

图 12 计算值与实际值对比

Fig.12 Contrast of calculated and actual values

4 实验研究

基于仿真结果,开展了在线实测研究。因条件受限,缺少实际设备,故搭建了基于 ACC 的 OLTC 样机,实验电路同图 3(a)。变压器型号为 TSGC2J,市电输入, $S_N = 20 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $w_2/w_1 = 1$,过渡电阻和负载参数与仿真一致,共实测了三种工况。ACC 控制电路为 F28335 主控单元驱动板,利用基于模型设计方法设计动作时序,经自制接口板上的 5 个继电器控制 $K_1 \sim K_5$ 动作,控制时序同图 3(b)。计算平台基于 dSPACE 半实物仿真系统。实验结构如图 13(a)所示。采样及监视设备为 PINTTECH DP100/100MHz、Tektronix A622/100kHz、Agilent DSO 7104A。

实验系统包括功率和测量、计算两部分,功率部分完成 OLTC 对变压器的切换动作,通过采样设备将信号引入 DS1103 板卡的 ADC 接口,后经 Matlab 中算法计算,通过 ControlDesk 输出切换电弧损耗数据,实现了在线检测功能。DS1103 板卡的 DAC 接口可引入示波器,方便监视。在线检测的程序流程如图 13(b)所示。

在阻性负载下完成了一次下行切换,采样时间

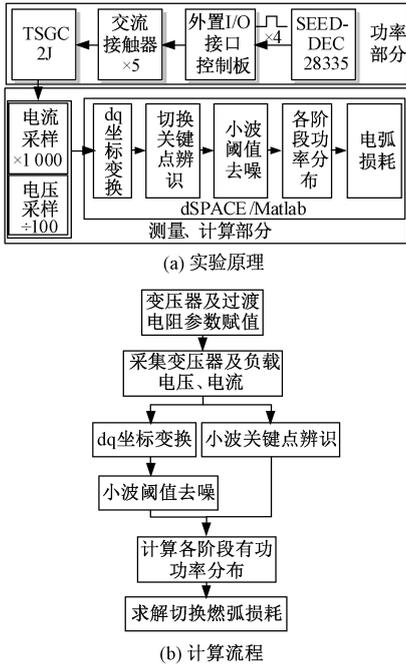


图 13 实验测试原理图

Fig.13 Experimental test schematic diagram

0.2 s。如图 14(a) 所示, 采样信号因干扰所致, d 轴信号含有脉动分量, 进行了小波阈值去噪^[20]。利用小波算法对切换系统电流进行了关键点辨识, 如图 14(b) 所示。可辨识各开关动作位置, 图 14(b) 中画圈部位为 K_1 熄弧点。确定了仿真模型是可信的。

依照仿真分析方法, 将三种负载工况下 K_1 、 K_2 两处电弧能量计算值与实际值绘制于图 15 中。

对比图 12 与图 15, 因实际切换过程中, ACC 开断相位不可控, 具有随机性, 故仿真与实测的两开断处实际燃弧能量存在差异。但不影响对电弧能量的判断, 即负载或触头工况的变化, 必然反映于燃弧能量计算值中。通过多次实测分析表明, 相同负载及开关下, 每次切换计算的数据分布较为集中, 故对比多次切换的燃弧能量计算值, 可确定负载变化或触头异常等工况, 从而起到监视测量的作用。本实测虽针对 ACC 开展, 但原理具有通用性, 不受触头等机械结构的影响, 对实际 OLTC 设备同样适用。

5 结论

(1) 提出基于功率守恒理论的 OLTC 燃弧损耗在线检测模型。仿真结果表明, 不同负载及电弧参数下, 电弧功率计算值与实际值变化规律相近, 电弧能量计算误差与燃弧过程的剧烈程度呈负相关性且

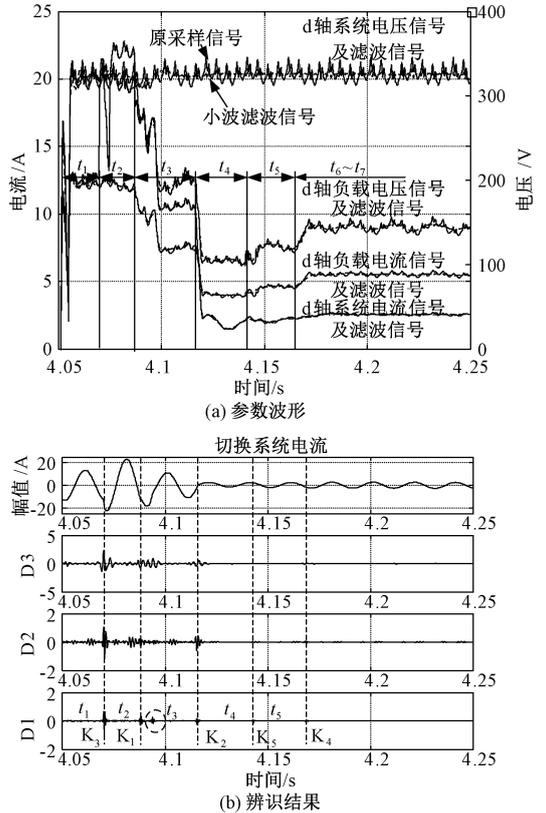


图 14 系统电压、电流 d 轴波形及小波辨识波形 (R)
Fig.14 d axis waveform of system voltage, current and wavelet identification (R)

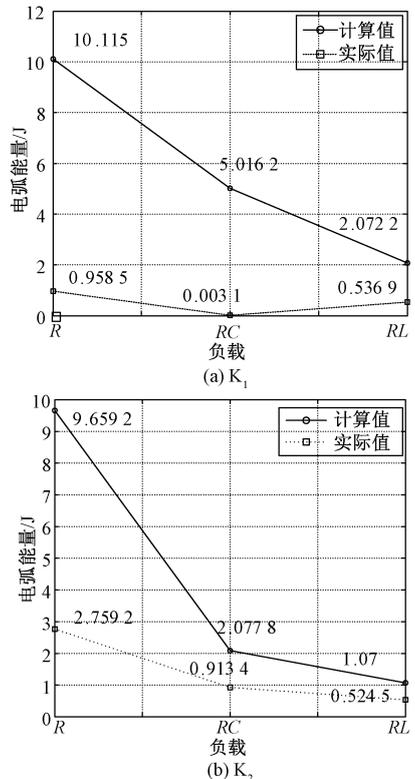


图 15 实测计算值与实际值汇总 (R)
Fig.15 Summary of measured calculated and actual values (R)

受电弧参数及负载的变化而改变,计算值可以被区分和鉴别。

(2)搭建了基于 ACC 的 OLTC 实验室样机,利用 dSPACE 平台完成对三种负载切换数据的在线计算。燃弧能量计算值与实际值具有相近的变化规律,且通过计算燃弧能量可区分和鉴别负载或触头工况的改变,即能够判断设备工况的变化,该结论可推广至不同开关结构,具有通用性。

(3)仿真与实测结果均表明在不同负载及触头工况下,燃弧能量计算值具有可辨识性,该特性可作为设备前后切换工况变化的判别依据,起到在线监视作用。

参考文献 (References):

- [1] 段若晨, 王丰华, 周荔丹 (Duan Ruochen, Wang Fenghua, Zhou Lidan). 基于优化 HHT 算法与洛仑兹信息量度的换流变用有载分接开关机械特征提取 (Mechanical features extraction of on-load tap-changer in converter transformer based on optimized HHT algorithm and Lorentz information measure) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (11): 3101-3109.
- [2] 周翔, 王丰华, 傅坚, 等 (Zhou Xiang, Wang Fenghua, Fu Jian, et al.). 基于混沌理论和 K-means 聚类的有载分接开关机械状态监测 (Mechanical condition monitoring of on-load tap changers based on chaos theory and K-means clustering method) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (6): 1541-1548.
- [3] 赵彤, 李庆民, 陈平 (Zhao Tong, Li Qingmin, Chen Ping). OLTC 振动信号特征提取的动力学分析方法 (Dynamic analysis method for feature extraction of mechanical vibration signals of on-load tap changers) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22 (1): 41-46.
- [4] 王丰华, 樊家昊, 郑一鸣, 等 (Wang Fenghua, Fan Jiahao, Zheng Yiming, et al.). 真空灭弧 OLTC 与油灭弧 OLTC 的振动特性对比 (Vibration characteristic comparison between vacuum arcing on-load tap-changer and oil blast on-load tap-changer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45 (9): 2834-2841.
- [5] 樊家昊, 汪卫国, 王丰华, 等 (Fan Jiahao, Wang Weigu, Wang Fenghua, et al.). 真空灭弧有载分接开关振动特性分析 (Vibration characteristics analysis of vacuum interrupters on-load tap-changer) [J/OL]. 电网技术 (Power System Technology). <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2354>.
- [6] 郑婧, 何婷婷, 郭洁, 等 (Zheng Qian, He Tingting, Guo Jie, et al.). 基于独立成分分析和端点检测的变压器有载分接开关振动信号自适应分离 (Adaptive separation of vibration signal of on-load tap changer based on independent component analysis and endpoint detection) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2010, 34 (11): 208-213.
- [7] 郭森 (Guo Sen). 有载分接开关扭矩在线监测 (On-line torque monitoring of on load tap changer) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2005, 41 (6): 443-448.
- [8] 赵彤, 李庆民, 张国强, 等 (Zhao Tong, Li Qingmin, Zhang Guoqiang, et al.). 有载调压分接开关驱动电机旋转角度的在线监测方法 (On-line monitoring method of the rotating angle of drive motor for on-load tap changers) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2005, 41 (5): 343-346.
- [9] Feizifar B, Usta O. A new arc-based model and condition monitoring algorithm for on-load tap changers [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 167: 58-70.
- [10] 王春平, 姜宁, 马宏忠, 等 (Wang Chunping, Jiang Ning, Ma Hongzhong, et al.). 基于光纤光栅温度测量的有载分接开关触头故障诊断装置 (Fault diagnosis device of on-load tap switch contact based on fiber bragg grating temperature measurement) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 200920230767.8, 2010-6-23.
- [11] 刘安宏, 张庆富, 陆杨, 等 (Liu Anhong, Zhang Qingfu, Lu Yang, et al.). 变压器有载分接开关切换触头烧损故障诊断的方法及装置 (Method and device for fault diagnosis of transformer on-load tap switch contact burning loss) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 201510216584.0, 2016-11-23.
- [12] 李紫薇 (Li Ziwei). 一种有载分接开关监测器 (The utility model relates to an on-load tap switch monitor) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 201210285696.8, 2013-1-2.
- [13] 毛晋生, 陈建杰, 钱江, 等 (Mao Jinsheng, Chen Jianjie, Qian Jiang, et al.). 变压器有载分接开关触头寿命在线监测方法及其装置 (On-line monitoring method and device for contact life of on-load tap switch of transformer) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): 201310621540.7, 2014-3-5.
- [14] 宋冬冬, 丁来伟, 董彪, 等 (Song Dongdong, Ding Laiwei, Dong Biao, et al.). 机械式有载分接开关改进方案的设计与研究 (Design and research on the improvement plan of the purely mechanical on load tap-

- changer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 5 (7): 2141-2149.
- [15] 刘海升, 陈文礼, 付志红, 等 (Liu Haisheng, Chen Wenli, Fu Zhihong, et al.). 基于 Nutall 窗的时移综合相位差谐波分析法 (Approach for power harmonic analysis based on Nutall window and synthesized phase difference correction) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (12): 54-70.
- [16] Hui X, Peng Z. Subspace-least mean square method for accurate harmonic and interharmonic measurement in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 27 (3): 1260-1267.
- [17] 宋冬冬, 丁来伟, 董彪, 等 (Song Dongdong, Ding Laiwei, Dong Biao, et al.). 基于信号处理的有载分接开关过渡电阻测量方法 (Method of the transition resistance measurement of on load tap changer based on signal processing) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2020, 46 (3): 922-930.
- [18] 宋冬冬, 程林, 林志法, 等 (Song Dongdong, Cheng Lin, Lin Zhifa, et al.). 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述 (Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2018, 44 (3): 932-943.
- [19] 宋冬冬, 丁来伟, 董彪, 等 (Song Dongdong, Ding Laiwei, Dong Biao, et al.). 不同拓扑结构有载分接开关燃弧过程实验分析与研究 (Experiment analysis and research on the arc process of different topology on load tap-changer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (12): 55-62.
- [20] 李胜辉, 白雪, 董鹤楠, 等 (Li Shenghui, Bai Xue, Dong Henan, et al.). 基于平稳小波变换与随机森林的电缆早期故障识别方法 (Cable incipient fault identification based on stationary wavelet transform and random forest) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (3): 40-48.

Research on on-line arc loss detection of on-load tap-changer based on power conservation theory

SONG Dong-dong^{1,2}, ZHANG Li-hong², MA Yu-quan², LIU Xi-yin², LV Xue-jiao²

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Mechanical Electrical and Engineering, Heibei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The divertering arc of the on-load tap changer (OLTC) will affect the life of the contact, so it is necessary to test its working condition. Based on dq coordinate transformation, fundamental wave component extraction and wavelet algorithm, an OLTC arc loss detection method based on power conservation theory is proposed in this paper. On the basis of clarifying the research idea, the equivalent schematic diagram and equivalent circuit of the autotransformer are established, and the power equation of the divertering process is deduced according to the power conservation theory. The transformer excitation parameters are calculated by the fundamental wave component extraction algorithm, and the OLTC simulation circuit is established by combining the Mayr arc model. Dq coordinate transformation algorithm was used to obtain the active power of each part of the circuit, and data of arc loss under nine working conditions were obtained. The OLTC prototype based on the ac contactor was built and the online measured calculation of arc energy under three load conditions was completed by using dSPACE platform. Considering the measurement and calculation errors, the simulation and measured results show that the calculation error of arc energy is negatively correlated with the intensity of arc burning process. Both the simulation results and the measured results are distinguishable, and the value changes with the change of working conditions, which can be used as a criterion for equipment switching working conditions. This characteristic is applicable to other switch structures, which proves that the study is effective. This work is expected to provide a theoretical basis for the development of OLTC online contact detection system.

Key words: OLTC; arc power; condition monitoring; dq coordinate transformation; signal processing