

阻性负载下低压故障电弧特性分析

王晓远,高 森,赵玉双

(天津大学 电气与自动化工程学院,天津 300072)

摘要: 通过搭建串联电弧检测试验平台,在不同功率的阻性负载下,采集正常和发生串联故障电弧状态下的线路电流,并分析了电流的时域特征和频域特征,包括零休时间、电流上升率、平均值、有效值以及各奇次、偶次谐波因数等。分析结果表明,选择2~6次谐波因数及其变化率作为串联故障电弧的判据较为合理。

关键词: 电弧; 断路器; 阻性负载; 时域分析; 频域分析; 傅里叶变换; 谐波因数; 谐波分析

中图分类号: TM 56

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.05.017

0 引言

随着社会的进步和人民生活水平的提高,居民用电负荷在不断增加,因此用电安全,特别是由于电弧故障而引起的火灾越来越受到关注^[1]。电弧故障断路器 AFCI (Arc Fault Circuit-Interrupter) 可及时检测到线路中的故障电弧,并在较短的时间内快速切断故障线路,防范因电弧故障而引起的火灾^[2]。

故障电弧是2个电势不相等的导体相互接近而引起的,伴随着发声、发光、发热的空气电离现象^[3-6]。串联故障电弧是指故障电弧与原线路负载呈串联关系存在。持续燃烧的串联故障电弧可等效为与原线路负载串联的近似阻性负载,因此发生串联故障时线路电流值受到线路负载的限制,小于正常情况下的线路电流^[3-7]。由于电弧燃烧产生的高温使金属触点融化、挥发,同时被电离的空气不断变化,因此电弧的传导路径及阻抗值均在不断变化之中,这使得故障电弧的持续燃烧存在随机性,发生串联故障电弧时的线路电流变化也存在随机性。

由于阻性负载在常用电器中占很大比例,且串联电弧不容易被检测到^[3,6,8-10],因此对阻性负载情况下的串联电弧进行分析很有必要。目前大部分文献仅给出了串联故障电弧电流的时域特征:当线路中发生串联故障电弧时,电流的幅值减小;由于串联电弧的熄灭和重燃特性,每个周期都会出现一段电流瞬时值等于0的时间(称为“平肩部”或“零休”)^[11];同时串联电弧状态下的电流上升率也与正常电流有所不同;一个周期内的电流正负半周波形也不再对称。文献^[12]指出,发生串联故障电弧时电流中的各次谐波因数也会发生变化^[13]。但是以上文献并没有分析线路中的负载对这些特征的影响,专门针对阻性负载进行串联故障电弧分析的文献也较少^[14-15]。

本文通过搭建串联电弧检测试验平台,采集不同功率时正常和故障状态下的电流数据,并分别从时域和频域角度,对线路电流进行详细的分析对比,探明负载大小对串联故障电弧的电流特征的影响,为串联故障电弧的检测提供了可靠的依据。

1 试验理论与设备

串联电弧示意图如图1所示。



图1 串联电弧

Fig.1 Series arc

1.1 时域指标计算

a. 零休时间。

由于串联电弧的熄灭和重燃特性,每个周期都会出现一段电流瞬时值等于0的时间,这一现象称为“平肩部”或“零休”。统计零休时间的方法:将采样数据按周期进行分组,每组中电流瞬时值的绝对值在设定值以下时判断为电流零休,统计每个周期内零休的总时长即为该周期电流的零休时间。

b. 上升速率。

将一个周期内的离散数据中相邻2个值作差,取其中的最大值和最小值表征电流的上升速率。

c. 电流平均值。

电流信号为离散数据时,设每周周期采样点数为 N ,则电流平均值的计算公式为:

$$I_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_k \quad (1)$$

其中, i_k 为采样点 k 的电流信号。

d. 电流有效值。

离散数据下的电流有效值计算公式为^[16]:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i_k^2} \quad (2)$$

收稿日期:2014-06-09;修回日期:2015-03-04

专利:中华人民共和国实用新型专利(CN202524053U,CN2030-25274U,CN102621377A)

1.2 频域指标计算

1.2.1 快速傅里叶变换

通过对采样信号进行傅里叶变换 FT(Fourier Transform),可以从频域角度分析信号特性^[17]。在计算机中,由于采集的数据是离散的,因此常采用离散傅里叶变换 DFT(Discrete Fourier Transform)求解信号频谱,其缺点是采集的数据长度越大则应用 DFT 算法的计算量也越大^[18]。

快速傅里叶变换 FFT(Fast Fourier Transform)是 DFT 的一种快速算法,运算时间一般可缩短一二数量级。每个周期的采样信号为一个长度为 N 的有限长度序列 $x(n)$,对 $x(n)$ 进行 FFT,得到表示各谐波分量大小和相位的序列 $d_j(j=1,2,\dots,N)$, d_j 为复数^[19]。因为 DFT 的共轭对称性,保留 $1\sim N/2-1$ 次谐波分量系数 $d'_j(j=1,2,\dots,N/2-1)$,然后对 d'_j 求模,得到表征各谐波分量权重的序列 $D'_j(j=1,2,\dots,N/2-1)$,其中基波的权重为 D'_1 。

1.2.2 谐波因数

第 h 次谐波因数 HF(Harmonic Factor)定义为第 h 次谐波分量有效值与基波分量有效值之比,即:

$$H_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (3)$$

其中, U_h 为第 h 次谐波分量有效值; U_1 为基波分量有效值。谐波因数常用于衡量电压波形质量。本试验选取的电流信号谐波特征向量 $\mathbf{P}$ 如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_{N/2-1}] \\ p_j = \frac{D'_j}{D'_1} \quad j=1, 2, \dots, N/2-1 \end{cases} \quad (4)$$

将选取的谐波特征向量经过归一化处理后, $p_j(j=1,2,\dots,N/2-1)$ 即为电流各次谐波分量的谐波因数,它反映了信号各个谐波分量相对于基波的能量权重^[20]。

1.3 试验平台搭建

目前还没有一种串联电弧数学模型可以精确地仿真各种工作状态下的串联电弧波形,用软件进行模拟得出的串联电弧波形带有一定的误差^[21]。为最大限度地模拟真实情况,减小误差,且实现对串联电弧电流的多次采集,便于分析比较,本文依照 UL1699 标准^[22],搭建了如图 2 所示的串联故障电弧的实物试验平台^[23],其包括开关、电弧发生器、负载、采样装置和示波器等设备。

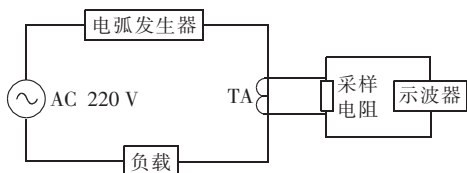
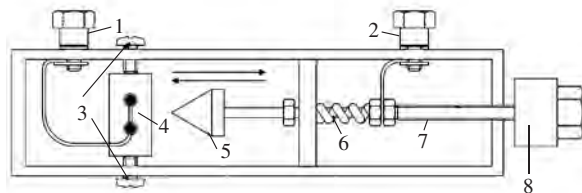


图 2 试验平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of test platform

电弧发生器用于产生持续燃烧的电弧,其结构如图 3 所示。它由固定电极和移动电极组成,2 个电极中必须有 1 个的末端是尖锐的,电极相互接触时电路完全闭合。本试验平台中的固定电极由表面平坦的石墨棒制成,移动电极由一端尖锐的铜棒制成,固定电极与移动电极分别与对应的接线柱相连。调节旋钮与螺杆相连,螺杆的另一端与移动电极相接触,通过转动调节旋钮即可横向调节移动电极,使其接近或远离固定电极,从而改变移动电极与固定电极之间的距离,产生电弧。



1—接线柱(接电源), 2—接线柱(接负载), 3—调节螺丝
4—固定电极, 5—移动电极, 6—弹簧, 7—螺杆, 8—调节旋钮

图 3 电弧发生器结构图

Fig.3 Structure of arc generator

2 试验与结果分析

2.1 试验方法

在试验平台上,通过调节移动电极与固定电极之间的距离来产生串联故障电弧,通过示波器分别采集正常和故障状态下电流波形与相关数据。由于串联电弧产生时存在较大随机性,且考虑到线路电流的大小有可能会对串联电弧的特性造成影响,因此分析时将分别采用功率为 800 W 和 4 000 W 的负载进行试验,并分多次采集记录 2 种状态下的电流波形。

2.2 时域对比

采集连续 50 个周期的电流数据,并按照上文提出的时域指标计算方法进行处理。由于电弧燃烧具有随机性的特点,且为了更好地体现各时域指标的波动性,本文对连续多个周期的时域指标进行统计,得出各时域指标的变化范围。以连续 50 个周期的各时域指标为样本,计算各指标的样本方差,称为波动率。当连续多个周期的某一时域指标比较分散(即数据波动较大)时,该时域指标的方差即波动率就较大;当该时域指标数据分布比较集中时,该时域指标的波动率较小。因此波动率越大,表明该时域指标的波动越剧烈;波动率越小,表明该时域指标的波动就越小。计算及统计结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,当线路处于正常状态时,除零休息时间外,各时域指标的波动率普遍较小,即各指标的分布较为集中,波动范围很小;负载功率不变时,除零休息时间外,其他时域指标在故障状态下的波动程度较正常状态下的波动程度更大。同时还可以看

出,无论线路处于正常状态还是故障状态,各时域指标在相同线路状态下的波动范围随着负载功率的增加而增大;负载功率较小时各指标在正常和故障 2 种状态下的波动范围相差很小(如电流有效值),甚至有相互重合的部分(如电流平均值)。

通过上述分析可以得出,串联故障电弧电流时域特征的变化不仅会受到线路状态的影响,还会受到线路中负载功率的影响,某些时域指标在负载功率较小时不适合作为判定串联故障电弧的可靠依据。当采用以上几种时域特征编制串联故障电弧检测算法时,线路中的负载功率将对算法有很大影响,很可能会导致算法检测时间不稳定,甚至使算法误判和失效。

2.3 频域分析

将采集的电流数据利用上文提到的频域指标方法进行计算,可得到电流的各次谐波因数。考虑到串联电弧的随机性特点,对谐波因数进行统计。图 4

为负载功率分别为 800 W 和 4 000 W 情况下,正常和发生串联故障电弧时 30 次以内的谐波因数对比。表 2 为不同负载情况下正常和故障状态时 10 次以内谐波因数变化情况统计。由图 4 和表 2 可以看出,在 10 次以内的谐波中,正常状态下,2、4、6、8 等偶次谐波因数较小,而 3、5、7 等奇次谐波因数较大。发生串联故障电弧时,高次谐波的成分总体变化较大,其

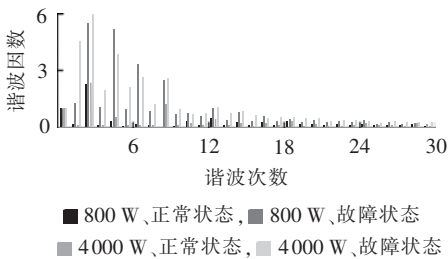


图 4 线路负载功率分别为 800 W 和 4 000 W 时,正常和故障状态下电流谐波因数对比
Fig.4 Comparison of harmonic factors between normal and faulty states for 800 W and 4 000 W load powers

表 1 不同负载功率及线路状态下,连续 50 个周期线路电流的时域特征

Table 1 Time-domain characteristics of line current for 50 continuous cycles in different conditions of load power and line state

时域指标	负载功率/W	波动范围		平均值		波动率	
		正常状态	故障状态	正常状态	故障状态	正常状态	故障状态
零休时间	800	—	[1,5.16] ms	—	2.662 ms	—	1.49×10^{-6} ms
	4000	—	[0.12,10.36] ms	—	3.402 ms	—	5.86×10^{-6} ms
电流平均值	800	[0.007,0.016] A	[-1.2,1.6] A	0.012 A	0.043 A	4.67×10^{-6} A	0.33 A
	4000	[0.46,1.1] A	[-51.2,66.6] A	0.8 A	0.12 A	0.02 A	226.17 A
电流有效值	800	[3.6,3.65] A	[3.3,3.47] A	3.63 A	3.402 A	0.000 13 A	0.001 6 A
	4000	[20.58,20.77] A	[14.44,20.35] A	20.67 A	19.31 A	0.003 6 A	1.31 A
电流上升率最大值	800	[0.16,0.24]	[0.24,2.88]	0.17	1.85	0.00064	1.11
	4000	[0.8,1.2]	[7.2,26.4]	1	16.52	0.044	54.19
电流上升率最小值	800	-0.16	[-3.28,-0.32]	-0.16	-2	0	1.67
	4000	[-1.2,-0.8]	[-21.6,-2.4]	-0.84	-12.28	0.016	36.06

表 2 不同负载功率及线路状态下,线路电流的频域特征

Table 2 Frequency-domain characteristics of line current for 50 continuous cycles in different conditions of load power and line state

谐波次数	负载功率/W	谐波因数波动范围		谐波因数平均值		谐波因数波动率		
		正常状态	故障状态	正常状态	故障状态	正常状态	故障状态	
奇次谐波	3	800	[2.23,2.29]	[1.96,9.10]	2.25	5.48	0.00061	8.26
		4000	[2.24,2.47]	[3.18,13.32]	2.38	6.26	0.00340	13.63
	5	800	[0.26,0.34]	[1.76,7.82]	0.31	5.20	0.00089	6.48
		4000	[0.38,0.65]	[1.82,5.89]	0.50	3.79	0.00780	1.99
	7	800	[0.068,0.27]	[1.45,4.67]	0.16	3.32	0.00480	1.60
		4000	[0.062,0.19]	[0.89,3.89]	0.11	2.60	0.00210	1.04
	9	800	[1.17,1.36]	[1.68,3.06]	1.26	2.47	0.00320	0.23
		4000	[1.11,1.26]	[1.49,3.18]	1.19	2.59	0.00200	0.23
偶次谐波	2	800	[0.069,0.23]	[0.28,3.66]	0.15	1.27	0.00350	1.46
		4000	[0.03,0.28]	[0.79,14.33]	0.11	4.87	0.00490	24.23
	4	800	[0.052,0.096]	[0.10,3.10]	0.078	1.09	0.00290	1.65
		4000	[0.038,0.18]	[0.59,5.17]	0.11	1.92	0.00190	1.65
	6	800	[0.054,0.15]	[0.098,2.33]	0.093	0.94	0.00083	0.66
		4000	[0.066,0.16]	[0.47,8.68]	0.11	2.20	0.00091	5.59
	8	800	[0.016,0.17]	[0.13,1.89]	0.11	0.81	0.00270	0.49
		4000	[0.028,0.18]	[0.45,2.35]	0.074	1.27	0.00210	0.45
	10	800	[0.005,0.085]	[0.17,1.73]	0.050	0.71	0.00066	0.27
		4000	[0.033,0.094]	[0.048,2.03]	0.063	0.94	0.00039	0.32

中奇次谐波成分较偶次谐波成分变化程度小,并且随着线路电流的增大,偶次谐波因数较奇次谐波因数有更明显的增加。

2.3.1 奇次谐波变化对比

图 5(a)为负载功率为 800 W 时 3、5、7、9 等奇次谐波因数在正常和发生串联故障电弧状态下的对比,串联故障电弧在第 10 个周期之后产生。由该图可以看出,正常情况下,3 次和 9 次谐波因数较高,5 次和 7 次谐波因数较低,且各奇次谐波因数基本保持恒定,波动范围很小;而在故障状态下,各奇次谐波因数均有所上升,且随着电弧的持续燃烧,奇次谐波因数变化剧烈,其变化剧烈程度按 3、5、7、9 次顺序减弱。

图 5(b)为负载功率为 4000 W 时各奇次谐波因数在正常和串联故障电弧状态下的对比,由该图可以看出,在线路电流较大时,各奇次谐波因数变化规律与 800 W 时相似,其波动范围有所增加。

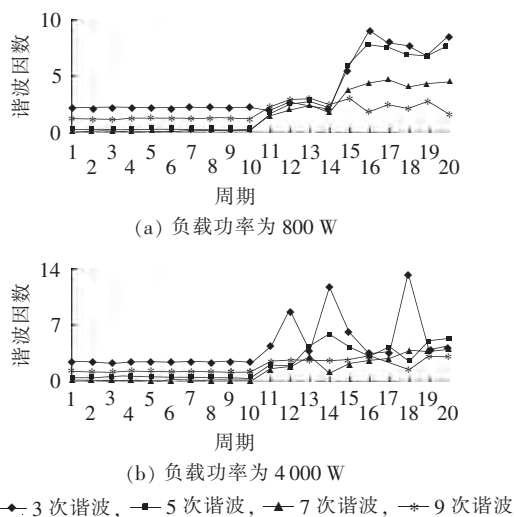


图 5 线路负载功率分别为 800 W 和 4000 W 时电流奇次谐波因数对比

Fig.5 Comparison of harmonic factor among odd orders for 800 W and 4000 W load powers

2.3.2 偶次谐波变化对比

图 6(a)为负载功率为 800 W 时,2、4、6、8、10 等偶次谐波因数在正常和串联故障电弧状态下的对比,串联故障电弧在第 10 个周期之后产生。由该图可以看出,正常状态下,各偶次谐波因数均维持在较低水平,基本保持恒定,波动范围较小,这是因为线路电流为正弦波,每个周期内正负半周的波形对称;而在故障状态下,由于电流波形不再对称,各偶次谐波因数均有所上升,且随着电弧的持续燃烧,偶次谐波因数有较为剧烈的变化,其变化剧烈程度按 2、4、6、8、10 次顺序减弱。

图 6(b)为负载功率为 4000 W 时,偶次谐波因数在正常和串联故障电弧状态下的对比,由该图可以

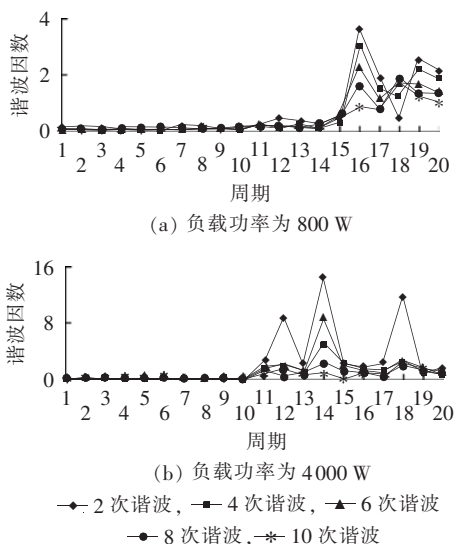


图 6 线路负载功率分别为 800 W 和 4000 W 时电流偶次谐波因数对比

Fig.6 Comparison of harmonic factor among even orders for 800 W and 4000 W load powers

看出,当线路负载增大时,正常状态下各偶次谐波因数变化规律与负载功率为 800 W 时相似,其中 2、4 次谐波因数波动范围变大,10 次谐波因数波动范围变小,6、8 次谐波因数波动范围基本不变;由于此时的电流波形不对称程度加剧,故障状态下的偶次谐波因数的变化也更加剧烈,其变化剧烈程度按 2、6、4、8、10 次顺序减弱。

通过对表 2 的分析可以看出,正常状态下,2 种负载下的各偶次谐波因数的波动范围大致相同。而故障状态下,除 10 次谐波外,大功率负载情况下各次谐波因数波动的上下限值较低负载情况下有所上升,且各次谐波因数的变化范围均有所扩大,轻、重负载情况下的波动范围均有重合部分。

2.4 统计结果分析

对比表 1 和表 2 可以发现,当线路状态相同时,2 种功率下的电流时域指标波动率相差至少一个数量级,时域指标在大电流情况下波动更加剧烈,电流的时域指标受负载功率影响较大;而 2 种功率下的大部分谐波因数的波动率相差较小,基本处于同一数量级,谐波因数的波动程度相似,这表明电流的谐波因数受负载功率影响相对较小。

但表 2 同时表明,大部分的谐波因数在正常状态下的变化范围上限值和故障状态下的变化范围下限值之间并没有较为明显的界线,因此谐波因数的大小也并不能作为充分判别串联故障电弧存在的依据。

从上文分析中还可以看出,发生串联故障电弧之后的高次谐波因数均会发生较大范围的波动,线路电流在发生串联故障电弧时奇次谐波中的 3、5 次谐波因数,偶次谐波中的 2、4、6 次谐波因数变化明显。综合以上分析可以得出,选取 2~6 次谐波因数

及其变化率作为判定串联故障电弧的标准较为合理,当这几次谐波因数中有若干次发生剧烈波动时,即可判定线路中存在串联故障电弧。

3 结论

本文通过搭建试验平台,从时域、频域 2 个角度对在纯阻性负载下不同功率时的串联故障电弧电流进行了详细的统计分析。通过对比发现,串联故障电弧电流的频域特征较其时域特征受线路负载的影响更小。根据串联故障电弧燃烧时具有随机性的特点,通过检测电流中高次谐波因数的含量及其变化程度即可有效检测线路中的串联故障电弧,为编写更可靠稳定的串联故障电弧检测算法提供了有力依据。

参考文献:

- [1] 李建基. 开关设备中的故障电弧及其防护[J]. 江苏电器, 2004(3):1-9.
LI Jianji. The break down arc and its protection in switchgear equipment[J]. Jiangsu Electrical Apparatus, 2004(3):1-9.
- [2] 周积刚, 刘金琰. 电弧故障断路器检测技术及相关标准[J]. 低压电器, 2013(22):20-56.
ZHOU Jigang, LIU Jinyan. Detection technique and related standard for arc fault detection device[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(22):20-56.
- [3] RESTREPO C E. Arc fault detection and discrimination methods [C]//The 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, PA, USA; IEEE, 2007:115-122.
- [4] 杨艺, 董爱华, 付永丽. 低压故障电弧检测概述[J]. 低压电器, 2009(5):1-4, 27.
YANG Yi, DONG Aihua, FU Yongli. Overview of low voltage fault arc detection[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(5):1-4, 27.
- [5] BECK J, NEMIR D. Arc fault detection through model reference estimation[C]//Power Systems Conference. New Orleans, LA, USA; SAE, 2006:920-927.
- [6] KIM C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(1):416-423.
- [7] MARTEL J M, ANHEUSER M, BERGER F. A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation[C]//Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM). Charleston, SC, USA; IEEE, 2010:199-219.
- [8] RABLA M, SCHWEITZER P, TISSERAND E. Method to design arc fault detection algorithm using FPGA[C]//IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM). Minneapolis, MN, USA; IEEE, 2011:138-142.
- [9] MULLER P, TENBOHLEN S, MAIER R, et al. Characteristics of series and parallel low current arc faults in the time and frequency domain[C]//Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM). Charleston, SC, USA; IEEE, 2010:223-229.
- [10] ARUNACHALAM S, DIONG B. A parametric model approach to arc fault detection for DC and AC power systems [C]//Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Tampa, FL, USA; IEEE, 2006:2249-2255.
- [11] 许逸. 故障电弧断路器的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
XU Yi. Research on arc fault circuit Interrupter[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [12] 廖水容, 张认成, 李夏河. 低压串联电弧故障电流高次谐波含有率试验[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2013(1):35-38.
LIAO Shuirong, ZHANG Rencheng, LI Xiahe. Experiment on current high order harmonic ration for series low voltage arc fault[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science Edition, 2013(1):35-38.
- [13] 贾宁, 李宏文, 魏幼平, 等. 一种新型电弧故障断路器的研究[J]. 低压电器, 2011(1):18-21.
JIA Ning, LI Hongwen, WEI Youping, et al. Research of a novel arc fault circuit interrupter[J]. Low Voltage Apparatus, 2011(1):18-21.
- [14] 宋政湘, 李东玮, 陈会林. 低压电弧故障的研究与分析[J]. 低压电器, 2009(17):1-8.
SONG Zhengxiang, LI Dongwei, CHEN Huilin. Research and analysis on low voltage arc fault[J]. Low Voltage Apparatus, 2009(17):1-8.
- [15] 印永嘉, 陈洪亮. 关于检测低压故障电弧的初步研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(8):20-23.
YIN Yongjia, CHEN Hongliang. Research on detecting low-voltage arc fault[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2007, 26(8):20-23.
- [16] 卢其威, 巫海东, 王肃珂, 等. 基于差值均方根法的故障电弧检测的研究[J]. 低压电器, 2013(1):6-13.
LU Qiwei, WU Haidong, WANG Suke, et al. Research on arc-fault detection based on difference-root method[J]. Low Voltage Apparatus, 2013(1):6-13.
- [17] 崔恒斌, 冯晓云, 宋文胜. 高速列车高次谐波负荷建模方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7):92-99.
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, SONG Wensheng. Modeling of high-order harmonic load for high speed train[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7):92-99.
- [18] 赵淑敏. AFCI(故障电弧断路器)的研制[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
ZHAO Shumin. Researching on designing the Arc Fault Circuit Interrupters (AFCI) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [19] 黄建才, 朱永利, 宋文胜. 基于 FFT 和 ITD 的绝缘子泄漏电流去噪[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10):101-106.
HUANG Jiancai, ZHU Yongli, SONG Wensheng. Modeling of high-order harmonic load for high speed train[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10):101-106.
- [20] 李永生, 张大海, 张晓东, 等. 基于闪变电压归算的间谐波源识别与物理实现[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7):144-148.
LI Yongsheng, ZHANG Dahai, ZHANG Xiaodong, et al. Modeling of high-order harmonic load for high speed train[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7):144-148.
- [21] 邹云峰. 低压电弧故障的研究及诊断[D]. 杭州:浙江大学, 2010.
ZOU Yunfeng. Research on Low-voltage Arc Fault and Diagnostic Method (AFCI) [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [22] Underwriter Laboratories Inc. UL1699-2006 UL standard for safety for arc fault circuit interrupters[S]. Northbrook, Illinois, USA; Underwriter Laboratories Inc (UL), 2008.
- [23] 吴晶莹. 一种新型低压电弧故障断路装置的研究[J]. 机电工程, (下转第 118 页 continued on page 118)

Short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis

YANG Dong¹, ZHOU Qinyong², LIU Yutian³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Ji'nan 250003, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

3. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: With the consideration of mutual restriction between short circuit current limiting and system stability improvement, a method of short circuit current limiting strategy optimization based on sensitivity analysis is proposed. The influence of current limiting measure on the impedance matrix element is analyzed and the sensitivity relationship between the current limiting measure and the self-impedance of node with over-current is derived, based on which, a branch selection strategy considering the sensitivity of current limiting measure is proposed. With the minimum total investment cost and the minimum short circuit capacity margin as the objectives, the adaptive hybrid particle swarm optimization algorithm is adopted to obtain the current limiting strategy set. A comprehensive evaluation model is established based on the analytic hierarchy process and the fuzzy comprehensive evaluation algorithm is applied to realize the systematic and quantitative decision-making for the current limiting set. The simulative results of a practical system show that the optimal current limiting strategy can be quickly obtained.

Key words: short circuit current limiting; short circuit currents; sensitivity analysis; particle swarm optimization algorithm; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation

(上接第 110 页 continued from page 110)

2009, 26(9): 40-42.

WU Jingying. A new low-voltage arc-fault circuit interrupter device[J]. Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(9): 40-42.

作者简介:

王晓远(1962—),男,河北唐山人,教授,博士研究生导师,研究方向为电机电磁场的分析与计算、特殊电机与电器的



王晓远

设计与控制(E-mail: xywang62@tju.edu.cn);

高 森(1989—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为故障电弧检测及永磁同步电机(E-mail: aimbbgsm@gmail.com);

赵玉双(1988—),女,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为高功率密度异步电机。

Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions

WANG Xiaoyuan, GAO Miao, ZHAO Yushuang

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A test platform of series arc faults is constructed and the line current is acquired in normal and series arc fault conditions for different resistive load powers. The time- and frequency-domain characteristics of the line currents acquired are analyzed, including rising rate, average, RMS, arc interval, odd/even harmonic factors and so on. The analytical results show that, the 2 to 6-order harmonic factors and their variation rates should be selected as the criteria of series arc fault detection.

Key words: electric arcs; electric breakers; resistive load; time domain analysis; frequency domain analysis; Fourier transforms; harmonic factor; harmonic analysis