

# 5 000 A 以上断路器显示电流与实际电流差异分析\*

李志伟 陈昕 忻尚芝 宋小兰 陈建兵

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093; 2. 中国质量认证中心 北京 100020;

3. 上海电器科学研究所集团有限公司 上海 200063)

**摘要:** 5 000 A 以上的断路器通常是每相由多极并联引出双接线端子的结构, 针对 5 000 A 以上万能式断路器正常工作时显示电流明显大于实测电流的情况, 显示误差通常超过企业规定精度的现象。通过理论分析和实际测试, 通过理论分析断路器内部以及连接排之间的互感和自感现象, 发现断路器每极阻抗不完全一致, 它们之间的负载电流数值不相等, 同相不同极上的负载电流之间存在明显的相位角, 相位角大约为  $32^\circ$ 。因为断路器内部和外接负载之间的互感和自感现象, 断路器显示电流比实际电流大, 它们之间的差值约为 5%。

**关键词:** 万能式断路器; 显示电流; 实际电流

**中图分类号:** TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Analysis of the difference between the display current and the actual current of circuit breaker above 5 000 A

Li Zhiwei Chen Xin Xin Shangzhi Song Xiaolan Chen Jianbing

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. China Quality

Certification Center, Beijing 100020, China; 3. Shanghai Electrical Appliance

Research Institute (Group) Co. Ltd., Shanghai 200063, China)

**Abstract:** More than 5000 A circuit breaker is usually each phase by multi-pole structure of parallel double terminal derivation, for above 5000A universal circuit breaker normal work shows the current is significantly greater than the measured current situation, the display difference is usually more than the accuracy of the manufacture given. In this paper, through the theoretical analysis and the actual test, Through the theoretical analysis of the circuit breaker inside and the connection between the mutual sense and self-inductance phenomenon, it is found that the impedance of each pole of the circuit breaker is not exactly the same, the value of the load current between them is not equal, there is a significant phase angle between the load currents at different poles at the same phase, the phase angle is about  $32^\circ$ . Because of the mutual inductance and self-inductance between the internal and external loads of the circuit breaker, the display is larger than actual current and the difference is about 5%.

**Keywords:** universal circuit breaker; display current; actual current

## 0 引言

万能式断路器又称框架式断路器,能接通、承载以及分断正常电路条件下的电流,也能在规定的非正常电路条件下接通、承载一定时间和分断电流的一种机械开关电器;主要用于保护交直流电路中电器设备免受过电流、逆电流、短路和欠电压等工况损害<sup>[1-8]</sup>。万能式断路器加载工作电流时,电流流过断路器和载流导体形成回路,对于大容量万能式断路器,其每相有双极或者多极并联<sup>[9-14]</sup>。本文研究了大容量断路器每极铜排上的电流与相电流的关系,以及相

电流(实际测量电流)与断路器显示电流之间的关系,同时通过对电流的计算和测量为《GB 14048.2-2008. 低压开关设备和控制设备第2部分:断路器》附录 G 中功耗的测量提供理论依据。

## 1 理论分析

在实际测量断路器每极上的负载电流时,断路器接线方式按照温升试验要求进行,每相的连接铜排都是平行放置并构成回路。两根平行的长直导线构成一个回路时,在

通交变电流时会产生自感和互感现象,假设导体内部的磁通量忽略不计,其自感公式如式(1)所示。

$$L = \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{\pi} \right) / \ln((d-a)/a) \quad (1)$$

式中: $L$ 为导体自感系数, $\mu_0$ 为真空导磁率, $l$ 为导体长度, $d$ 为导体间距, $a$ 为导体截面半径。其互感公式如式(2)所示。

$$M = \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{2l}{d} - 1\right) \quad (2)$$

式中: $M$ 为导体互感系数, $\mu_0$ 为真空导磁率, $l$ 为导体长度, $d$ 为导体间距。

通过式(1)和(2)可知,每极上连接铜排的阻抗  $Z = R + i\omega L + i\omega M$ ,除了断路器负载工作自感因素时,铜排之间的互感现象会影响其承载电流。以3 200 A 三极断路器为例,每相都由一极引出一个端子,其采用水平接线的方式<sup>[9-10]</sup>。平面示意图如图1所示。

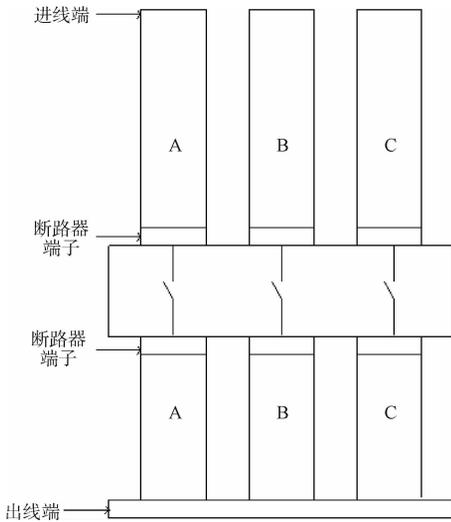


图1 断路器接线平面图(3 200 A)

分析每相铜排阻抗时将A相上的几根并联连接铜排视作一个整体,由于A、C两相之间刚好是对称的,理论上其受到自感和互感的影响是一致的,以A相为例,A相受到自感和B、C两相互感的作用,其阻抗为:

$$Z = R + i\omega L + i\omega M_1 + i\omega M_2 \quad (3)$$

式中: $Z$ 为连接铜排阻抗, $R$ 为连接铜排电阻, $L$ 为连接铜排自感系数, $M_1$ 为A、B两相连接排互感系数, $M_2$ 为A、C两相连接排互感系数。

将式(1)和(2)代入式(3)可以得到:

$$Z = R + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{\pi} \right) / \ln((d-a)/a) + \quad (4)$$

$$i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{2l}{d_1} - 1\right) + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{2l}{d_2} - 1\right)$$

实际上连接排的长度和截面都是一致的,其他参数也都相同。通过式(4)可以得到,影响A相阻抗的主要因素是连接排之间的间距,同时A相和C相是对称的,所以  $Z_A = Z_C$ 。

由于断路器每相之间是等间距的,式(4)可以简化为:

$$Z_A = Z_C = R + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{\pi} \right) / \ln((d-a)/a) + \quad (5)$$

$$i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{2l}{d_1} - 1\right) + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{l}{d_1} - 1\right)$$

其中  $d_1$  为相间距。根据式(1)和(2)可以得到的B相的阻抗:

$$Z_B = R + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{\pi} \right) / \ln((d-a)/a) + 2 \times$$

$$i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) / \ln\left(\frac{2l}{d_1} - 1\right) \quad (6)$$

根据式(5)和(6)可以得到,断路器每相阻抗中其铜排的电阻是相同的,不同的是感抗,而A、C两相是对称的其感抗在理论上相等,B相在中间位置其感抗与A、C两相不同,且B相的感抗最小,即  $L_B < L_A = L_C$ ;因此,  $|Z_A| = |Z_C| > |Z_B|$ 。通常6 300 A 断路器内部是由两个3 200 A 三极断路器并联组成,每相都是双极并联引出双接线端子,采用竖直接线方式。做温升试验时,选用铜排的尺寸是6根100 mm×10 mm,断路器每个接线端子都连接3根100 mm×10 mm的铜排,端子间的相间距为100 mm,同相上两接线端间距为85 mm;如图2所示,万能式断路器加载工作电流时,断路器每相都是双极并联的,其连接铜排本身会存在自感,同时铜排之间也存在互感,所以实际每根铜排上的阻抗是不相同的;相比3 200 A 断路器,6 300 A 断路器在整体上也是对称的,那么根据3 200 A 断路器之间阻抗的关系,可以对应得到6 300 A 每相每极上的阻抗关系以及阻抗计算公式;其中  $Z_{A1} \approx Z_{C2}$ ,  $Z_{A2} \approx Z_{C1}$ ,  $Z_{B1} \approx Z_{B2}$ ;以A相为例,可以得到A相上的两极A1和A2的阻抗,阻抗分别如式(7)、(8)所示。

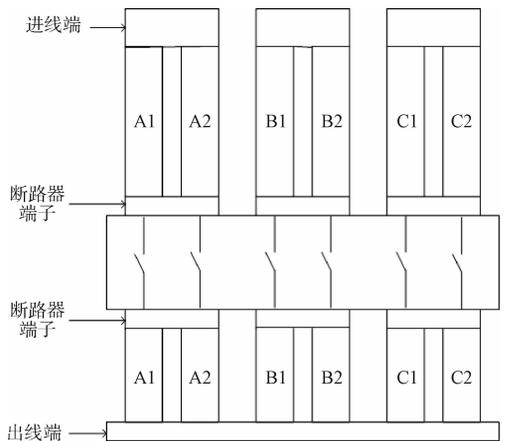


图2 断路器接线平面图(6 300 A)

$$Z_{A1} = R + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{\pi} \right) / \ln((d-a)/a) + i\omega \left( \mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi} \right) \cdot$$

$$\left[ \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_1} - 1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_1 + d_2} - 1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{2d_1 + d_2} - 1\right)} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{2d_1+2d_2}-1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{3d_1+2d_2}-1\right)} \right) \quad (7)$$

$$Z_{A2} = R + i\omega\left(\mu_0 \cdot \frac{l}{\pi}\right) / \ln((d-a)/a) + i\omega\left(\mu_0 \cdot \frac{l}{2\pi}\right) \cdot$$

$$\left[ \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_1}-1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_2}-1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_1+d_2}-1\right)} \right. \\ \left. \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{d_1+2d_2}-1\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2l}{2d_1+2d_2}-1\right)} \right] \quad (8)$$

式中： $d_1$  为断路器的同相两端子(85 mm)， $d_2$  为断路器的相间距(100 mm)。

对比式(7)和(8)可以得到，同相上的两极的感抗是不一样的  $L_{A1} > L_{A2}$ ，同样它们之间的阻抗也不相同，且  $|Z_{A1}| > |Z_{A2}|$ 。

断路器内部阻抗主要是材料内阻、接触电阻及铁芯能量线圈等组成，同样由于自感、互感及铁芯能量线圈安装在极的位置影响，断路器内部每极上的阻抗也不相同。在进行温升试验时，断路器内部阻抗占试验回路的总阻抗成分相对较小，对于整个回路来说，连接铜排的阻抗占主要成分。

## 2 试 验

### 2.1 试验条件

在实际测量断路器每个端子上的负载电流时，断路器接线方式按照《GB 14048. 2-2008. 低压开关设备和控制设备第 2 部分：断路器》的温升试验要求进行。万能式断路器电流测量在常温下进行，断路器连接导体的尺寸和根数以及具体的布置按照温升试验的要求，连接铜排之间的间隔与断路器端子之间的间隔要保持一致，其次铜排应涂黑色无光漆，铜排和断路器端子(或者转接排)连接处不能涂黑漆<sup>[3]</sup>；在设置试验电流时，每相的试验电流与额定电流之间允差范围要在 5% 以内，同时每相的平均试验电流不能小于所测规格的额定电流<sup>[3-4]</sup>。

在利用数据采集系统测量电流时，对于每相由一极引出一个端子的断路器，需要分别将罗科夫斯基线圈<sup>[5]</sup>套在每相铜排的进线端或出线端，同时要保证 3 只罗科夫斯基线圈套入三相试验端口的绕向保持一致；对于每相由两极(或多极)引出两个端子的断路器，需要对单相每个端子连接排进行测量，将其中的两个线圈分别套在某相的两个端子的连接排上，1 个线圈套在该相两个端子连接排上测量该相总电流，同时也要保证 3 个线圈的绕向一致，在实际测量时要根据测量断路器的规格来调节积分器上的电流量程。

### 2.2 实验结果

1) 5 000 和 6 300 A 断路器每个接线端子上的电流和相电流的关系

本次试验选用壳架等级电流为 5 000 和 6 300 A 的万能式断路器。5 000 A 断路器采用水平接线方式，下进上出

的进出线方式；6 300 A 断路器采用垂直接线方式，下进上出的进出线方式。5 000 和 6 300 A 断路器测量注意事项和测量步骤是一样的，测量时分别将罗科夫斯基线圈套在进线端的起始位置处或者出线端的末端，分配好电流的采集通道后，采用数据采集系统中的 TeamDesk. exe. 来采集记录每次测量时的电流波形，在利用电流波形读取电流有效值时，如果电流波形发生零漂时，需要对电流波形进行修正。通过记录的电流波形来读取电流有效值，每次测量时由于罗科夫斯基线圈<sup>[5-6]</sup>数量的限制，每次测量只能测量单相的电流，在实际测量时，将其中两个线圈套在某相的进线端，将剩下的套在该相上去测量该相总的电流，同时也要注意 3 个线圈的绕向要保持一致。所测电流波形如图 3 和 4 所示，记录下所测电流如表 1 和 2 所示。

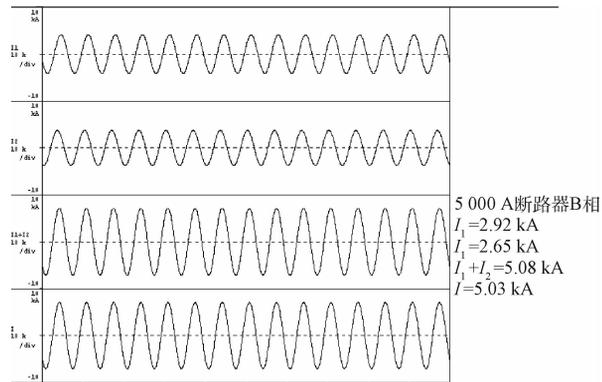


图 3 5 000 A 断路器 B 相电流波形

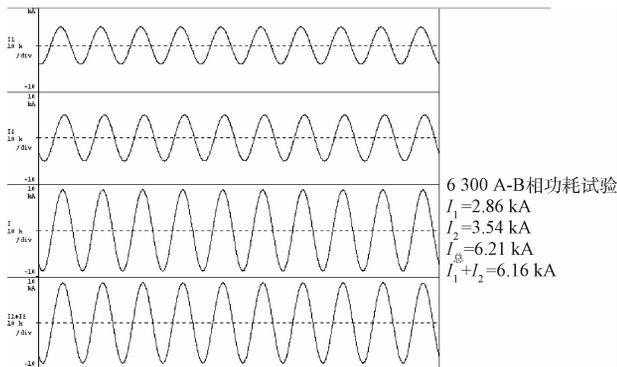


图 4 6 300 A 断路器 B 相电流波形

$I_1$  指的是  $B_1$  端子上的电流， $I_2$  指的是  $B_2$  端子上的电流， $I$  总为 B 相的相电流， $I_1 + I_2$  为 B 相上两极电流矢量相加得出的波形。通过观察图 3 和图 4 可知，其同相上的两端子输入电流并不完全相同，且存在着相位角差，5 000 A 断路器的相位角为  $47.9^\circ$ ，6 300 A 断路器的相位角为  $32^\circ$ ；用数据采集系统直接测量的相电流波形和通过两极矢量相加得出的波形基本吻合。根据图 3 和 4 分别计算出断路器每相上的电流，同相不同极的电流一致矢量相加后的电流如表 1、2 所示，其中相电流指实际测量的电流。

表 1 某厂家 5 000 A 断路器两极矢量和成的电流与相电流的关系

电流	A		B		C	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
端子电流/kA	2.01	3.11	2.65	2.92	3.05	2.08
相电流/kA	5.10	5.03	5.04			
矢量合成/kA	5.10	5.08	5.07			
误差百分比/%	0	0.99	0.59			

表 2 某厂家 6 300 A 断路器两极矢量和成的电流与相电流的关系

电流	A		B		C	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
端子电流/kA	2.69	3.64	2.86	3.54	3.70	2.69
相电流/kA	6.32	6.16	6.33			
矢量合成/kA	6.31	6.21	6.34			
误差百分比/%	-0.16	0.8	0.3			

通过图 3 和 4 以及表 1 和 2 可以看出,同相不同端子的输入电流之间存在差异,二者之间在数值上不均等,尤其是 A 相和 C 相,两端子之间的电流相差 1 000 A。

以 A 相为例,结果显示 A<sub>1</sub> 上的电流明显小于 A<sub>2</sub> 上的电流,这刚好印证了式(7)和(8)中 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 两极的阻抗不同,且  $L_{A1} > L_{A2}$ ,  $|Z_{A1}| > |Z_{A2}|$ ;将两极电流矢量相加后的值与实际所测的相电流在波形和数值上是一致的。

通过图 3 和 4 可以得到两种规格的断路器的相电流和标量叠加后的总电流,数据如表 3 和 4 所示。

表 3 某厂家 5 000 A 断路器两极矢量和成的电流与相电流的关系

电流	A		B		C	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
极电流/kA	2.01	3.11	2.65	2.92	3.05	2.08
相电流/kA	5.10	5.03	5.04			
标量叠加/kA	5.12	5.57	5.13			
误差百分比/%	0.39	10.7	1.8			

表 4 某厂家 6 300 A 断路器两极矢量和成的电流与相电流的关系

电流	A		B		C	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
极电流/kA	2.69	3.64	2.86	3.54	3.70	2.69
相电流/kA	6.32	6.16	6.33			
标量叠加/kA	6.33	6.4	6.39			
误差百分比/%	0.16	3.9	0.94			

通过表 3 和 4 可以看出,如果认为断路器每相上的两极电流是同相位的,直接将其电流通过标量相加的形式来计算相电流,其值是大于所测的相电流;5 000 A 和 6 300 A 断路器都是 B 相的差值最大,5 000 A 的最大误差达到了 10.7%,6 300 A 的最大误差达到了 3.09%。

结合图 2 和 3 以及表 1~4,结果显示,对于单相多极型万能式断路器,在加载工作电流时,其同相两极上的电流波形之间存在着相位角,在计算相电流时要通过矢量相加来计算。

#### 2) 7 400 A 断路器电流分布情况

本次试验选用壳架等级电流为 7 400 A 的万能式断路器,其额定电流为 7 400 A。断路器采用垂直接线方式,下进上出的进出线方式,其铜排选用的尺寸是 6 根 120 mm×10 mm。具体试验操作以及要求按照 1) 进行。罗科夫斯基线圈套在出线端和进线端电流大小对比如表 5 所示。

表 5 磁环套在不同位置处采集读取电流(7 400 A)对比

	A 相		B 相		C 相	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
进	2.997	4.353	3.58	4.178	4.445	2.992
出	3.129	4.237	3.645	3.986	4.39	3.075
进线占比/%	40.77	59.22	46.15	53.85	59.77	40.23
出线占比/%	42.48	57.52	47.77	52.23	58.81	41.19
差值/%	1.7	-1.7	1.6	-1.6	-0.96	0.96

由表 2 可知,分别将罗科夫斯基线圈套在进线端和出线端时,对同相同极来说,其进线端和出线端所测电流之间的误差在 2% 以内,并且其同相两极之间的差值所占百分比在数值上相等,A<sub>1</sub> 极多的占比和 A<sub>2</sub> 极少的占比刚好相同;每极铜排上进线端的电流近似等于出线端的电流,也就是电流在整个回路中基本一致;A、C 两相来说,其两极上的电流并不是相同的,且差值比较明显,从侧面印证了式(7)和(8)中得出的结论,即 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub> 两极的阻抗不同,且  $L_{A1} > L_{A2}$ ,  $|Z_{A1}| > |Z_{A2}|$ 。

#### 3) 断路器面板显示电流与实际电流关系

结合 1) 和 2) 试验数据,可以得出断路器实际测量电流和断路器面板显示电流的关系,显示电流为断路器面板上显示的值,通常断路器面板显示的为断路器各相电流的最大值,所以将对应相的实测值来进行对比,其中实测值为 1) 和 2) 中所说的相电流,二者之间具体数值关系如表 6 所示。

通过表 3 结果可以看出,断路器面板显示的值与实际测量的值之间的差值在 5% 左右,而厂家通常要求断路器显示电流的精度为 1.5%,实际测试结果反映断路器面板显示值大于实际测量的值,主要原因是断路器并联各极阻抗不均等。由于并联各极阻抗的不一致,造成断路器每极

表6 断路器面板显示与实际测量电流数据对比

断路器规格/A	显示值/A	实测值/A	差值/A	差值百分比/%
6 300	6 482	6 320	162	2.6
7 400	7 740	7 420	320	4.3

通过电流不相等,且并联各极之间的电流之间还存在着相位角;而断路器的内部并联脱扣器计算电流时采取并联各极标量相加,标量相加必然会大于矢量结合即实际值。

### 3 实验结果与分析

结合理论推导,对于三相单极型断路器,由于断路器连接排以及断路器内部之间自感和互感的影响,断路器每相阻抗不相同,其中B相的阻抗 $|Z_B|$ 最小,且铜排阻抗占总阻抗的主要成分;对于三相多极型断路器,同样由于自感和互感的影响,其同相上的每极阻抗不同,以A相为例, $|Z_{A1}| > |Z_{A2}|$ ;通过试验,结果显示,对于三相多极型断路器,其同相每极上的电流均不相同,且 $|I_{A2}| > |I_{A1}|$ ;每极电流不同刚好验证了断路器每极阻抗不一致,同时进出线端电流一致也验证了断路器整个回路中,铜排阻抗占主要成分。在实际测量断路器电流时,由于断路器内部并联的不平衡以及连接铜排阻抗不对称,标量相加的电流值必然大于矢量相加的实际值,同时试验中断路器显示电流比实际测量的电流大,刚好对其进行了印证。值得注意的是显示值与实际值之间的差值百分比有可能超过了企业的宣称值的电流测量精度值。

### 4 结 论

万能式断路器作为低压成套设备中接通以及分断电流的主要元件,其性能和实际应用情况应该受到更多的关注。本文通过对5 000 A以上断路器每极电流和总电流的研究,得到了极电流和相电流的关系,以及实际测量电流与断路器面板显示电流之间的关系,研究电流之间的关系有利于计算多极断路器的相电流,同时显示电流和实测电流的进行对比,为断路器在实际保护应用提供重要参考依据,确保断路器更加稳定安全的运行,对保障国家用电安全具有重大意义。

### 参考文献

- [1] 陆俭国,何瑞华,陈德桂,等. 中国电气工程大典第11卷配电工程[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 许志红. 电气理论基础[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

- [3] GB 14048.2-2008. 低压开关设备和控制设备第2部分:断路器[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [4] 陈建兵. 万能式断路器温升与工作电流的关系研究[J]. 电器与能效管理技术,2016(11):75-78.
- [5] 刘顺新,闫利超,张丹. 基于罗科夫斯基线圈的脉冲电流的测量[J]. 仪表技术与传感器,2007(11):63-65.
- [6] IEC60898-1995 Circuit-breaker for overcurrent protection for household and similar installation[R]. 1995.
- [7] SCHUELLER P. LV breaking by current limitation, Cahier technique No. 163 [Z] Schneider Electric intranet.
- [8] ROBBINS T. Circuit-breaker model for over-current protection simulation of DC distribution systems[J]. Intelc, 1994.
- [9] 陈鹏,王拓宇,任世彬. 基于DSP的智能低压断路器控制器设计[J]. 电工电气,2010(4):8-11.
- [10] 许广龙,曾成,杨磊,等. 万能式断路器大电流试验自动测试系统[J]. 电器与能效管理技术,2010(5):24-26.
- [11] 章上聪,许海波,吴桂初,等. 塑壳断路器分断角速度非接触式检测方法及其应用[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(7):995-1002.
- [12] 孙曙光,赵黎媛,杜太行,等. 基于电机电流分析的万能式断路器机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报,2017,38(4):952-960.
- [13] 袁亮,张旭乐,张贺,等. 基于多量程控制罗氏线圈标准电流互感器研究[J]. 国外电子测量技术,2016,35(11):88-93.
- [14] MARINO P, RUBINO G, RUBINO L, et al. Universal circuit breaker for aeronautic testing application[C]. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, IEEE, 2017.

### 作者简介

李志伟,硕士研究生,研究方向为电力电子与电气传动。

E-mail:599131148@qq.com