

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.10.019

# 基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力研究

李新海, 曾新雄, 刘建辉, 林雄锋, 孟晨旭

(广东电网公司中山供电局, 广东 中山 528401)

**摘要:** 针对变压器抗短路能力的强度对电力系统的影响,文中提出了采用零损耗深度限流技术来提高变压器抗短路能力的方法。其过程为:首先分析变压器故障类型及从物理角度探讨了变压器的动稳定性,研究变压器抗短路能力下降的具体原因;其次分析零损耗深度限流技术基本工作原理,得出零损耗深度限流技术可以提高变压器抗短路能力的结论;最后提出基于零损耗深度限流技术提高变压器抗短路能力基本应用原则,并通过算例分析该方法的可行性。提出的提高变压器抗短路能力的方法更经济、高效。

**关键词:** 变压器; 抗短路能力; 物理角度; 零损耗深度限流技术

## Study on Anti-short-circuit Ability of Transformer Based on the Zero Loss Deep Current Limiting Technology

LI Xinhai, ZENG Xinxiong, LIU Jianhui, LIN Xiongfeng, MENG Chenxu

(Zhongshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangdong Zhongshan 528401, China)

**Abstract:** In consideration of the anti-short circuit ability of transformer impacted on the power system, the zero loss deep current limiting technology is put forward to improve the anti-short circuit ability of transformer in this paper. Firstly, the fault type and dynamic stability of transformer are analyzed from physical perspective, and the specific cause for the decline of anti-short circuit ability of transformer is studied. Further the basic working principle of the zero loss deep current limiting technology is analyzed, the obtained conclusion is that the technology can improve the anti-short circuit ability of transformer. Finally the basic application principle is put forward that the anti-short circuit ability of transformer promoted by the zero loss deep current limiting technology, and the feasibility of this method is analyzed by an example. The method proposed in this paper to improve the anti-short circuit ability of transformer is more economic and efficient.

**Key words:** transformer; anti-short-circuit ability; physical perspective; zero loss deep current limiting technology

## 0 引言

变压器是电网中不可缺少的电气设备<sup>[1]</sup>,变压器安全稳定运行对电网的安全起着重要的作用。近年来,变压器因抗短路能力不足引起的事故已成为变压器事故的首要原因,严重影响了电力变压器的安全、可靠运行<sup>[2]</sup>。如何提高变压器抗短路能力已成为国内外学者研究的热点。

目前,国内学者在提高变压器抗短路能力作了大量的研究。文[3]在分析了变压器短路故障和抗短路能力不足的基础上,提出了几种提高变压器抗短路能力的措施;文[4]采用有限元数值计算方法,建立了变压器绕组的短路电动力等效计算模型并进行分析,得出了变压器绕组是影响变压器短路电动力的主要因素,分析了提高变压器耐短路能力的方法;文[5]分析了由于出口短路造成的变压器损坏的具体实例,指出了变压器目前存在的问题,对变压器选

收稿日期:2017-04-10; 修回日期:2017-05-29

基金项目:国家自然科学基金(51367018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51367018).

型、结构改进等提出改进的建议;文[6]提出了变压器抗短路能力的研究思路,进一步分析了变压器抗短路能力的影响因素,在此基础上提出了提高变压器抗短路能力的措施;文[7]从变压器设计、工艺及结构方面探讨了要考虑的问题,对变压器运行维护方面提出了建议;文[8]分析了基于有限元法的大型变压器抗短路能力,通过该分析方法验证了关于绕组机械强度分析的有效性,为购买新的变压器评估其抗短路能力提供了依据。从上述分析可知,国内学者主要集中对变压器短路能力计算和提高抗短路能力工艺方面的展开了研究。

文中提出了采用零损耗深度限流技术提高变压器抗短路能力方法,首先分析了零损耗深度限流技术的基本工作原理,探讨了变压器故障类型;其次分析了变压器抗短路冲击能力下降的原因,得出了采用零损耗深度限流技术可以变向提高变压器抗短路能力的结论;最后,在上述的研究的基础上,提出基于零损耗深度限流技术提高变压器抗短

路能力的基本应用原则,通过算例验证该方法的可行性。

## 1 基于快速真空断路器技术的零损耗限流装置的工作原理

### 1.1 快速真空断路器基本工作原理

快速真空断路器是基于快速涡流驱动技术,一种电容器储能、涡流盘驱动、永磁保持、直动式的快速永磁真空断路器<sup>[9-10]</sup>;涡流驱动机构是由灭弧室、绝缘子、分/合闸线圈、涡流盘等组成。送电后充电电源向分/合闸储能电容充电,利用储能电容对分/合闸线圈放电,产生极短时间的脉冲电流,分/合闸线圈磁通在涡流盘感应到涡流,在电磁推力的作用下带动断路器动触头完成分/合闸动作,工作原理见图1。真空快速断路器其机械分闸时间1.5~5 ms、最大开断电流不小于80 kA、连续分断操作100次、开断速度快、开断能力强、机械寿命长、动作分散度小是其主要特点。

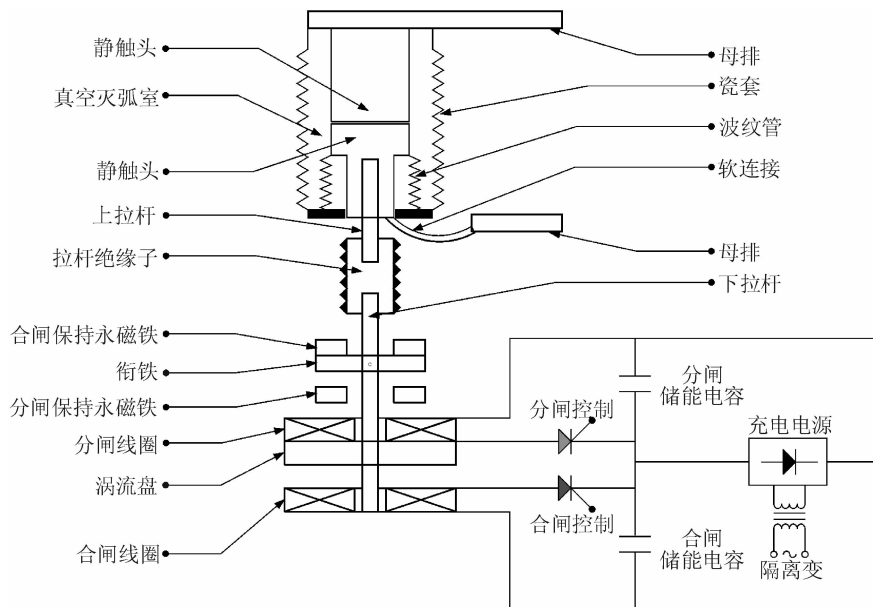


图1 VFC系列涡流驱动快速真空断路器工作原理

Fig. 1 VFC series eddy current drive fast working principle of the vacuum circuit breaker

### 1.2 零损耗深度限流装置原理

传统的断路器分合闸时间最小40~60 ms以上<sup>[9]</sup>,不能满足快速切断故障的要求。涡流驱动快速真空断路器弥补了传统断路器不足,能够满足快速切断故障的要求<sup>[10-14]</sup>。面临电力系统短路电流超标问题,使用较为广泛的方法就是加装限流电抗器<sup>[15-16]</sup>。目前,使用较多的是将爆炸型大容量高速开断装置和电抗器并联运行,该方法可以解决电抗器有功、无功损耗、漏磁场等问题,但电抗器投入工作并未解决限流深度问题<sup>[14]</sup>。文[17]提出了零损耗深度限流装

置比普通限流器更节能、更经济。

零损耗深度限流装置原理图见图2,由图2可看出,零损耗深度限流装置是由“换流器”与“限流电抗器”并联而成的开关设备,再经由 $K_1$ 、 $K_2$ 点串接在供电线路中。其中换流器是以涡流驱动快速真空断路器整合了短路电流快速判断的测控装置的组合电器,作为控制限流电抗器投退的执行部件,限流电抗器是深度限流器。限流电抗器正常运行时被换流器旁路处于退出状态,损耗为零,一旦发生短路故障,换流器在7~8 ms之内动作,在短路电流的

第1次过零点投入限流器实现深度限流,故障解除后限流电抗器再自动退出,实现零损耗运行。该装置的主要特点是正常运行时电抗器退出运行,电抗器不产生串联压降,提高供电质量;电抗器不产生大量的有功损耗;电抗器的电抗值可以根据需要配置到80%,在故障时投入电抗器达到深度限流,极大降低短路电流对电气设备的短路冲击。

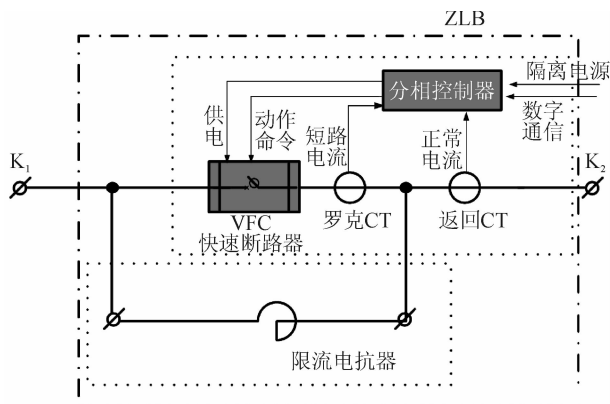


图2 零损耗深度限流装置原理图

Fig. 2 Principle diagram of zero loss depth limiting device

## 2 变压器抗短路冲击能力下降分析

### 2.1 变压器故障分析

油箱外故障和油箱内故障是变压器2种故障类型<sup>[1]</sup>,而变压器自身抗短路能力不足或者由于系统发生短路是变压器发生故障的主要原因,质量不良或者雷击等原因造成变压器故障发生的概率较小,变压器事故原因分类统计表见表1。

表1 变压器事故原因分类统计表

Table 1 Statistical table of the cause of transformer accident

| 序号 | 事故原因           | 百分比/% |
|----|----------------|-------|
| 1  | 抗短路能力差         | 22.58 |
| 2  | 短路冲击损坏         | 12.90 |
| 3  | 多次短路冲击、抗短路能力差  | 35.48 |
| 4  | 长时间短路冲击、抗短路能力差 | 12.90 |
| 5  | 质量不良           | 6.45  |
| 6  | 工艺不良(撑条过短)     | 3.23  |
| 7  | 雷击             | 3.23  |
| 8  | 受潮后绝缘强度下降      | 3.23  |

从表1统计结果可以看出,变压器抗短路能力不足造成的变压器事故明显高于其他原因。由此可见,变压器的耐短路能力的强度影响着电力系统的安全稳定运行<sup>[3,7]</sup>。变压器抗短路能力试验实际是对其机械强度的耐受性试验<sup>[8]</sup>,短路电流会造成变压器承受巨大的电动力,虽然在时间尺度上持续时间相对较短,但对变压器动稳定性产生极大的影

响。1996—1998年期间国外统计资料显示<sup>[18-19]</sup>,133台变压器在荷兰KEMA试验其抗短路能力,只有51台变压器获得资质认定。

GB 1094.5-1985提供了变压器承受短路能力验证的计算方式。文中仅从物理的角度分析变压器的动热稳定性。

### 2.2 热稳定分析

变压器在短路过程会产生很大的短路电流,导致变压器会发热,并且绕组导体因发热变软甚至烧坏,降低导体的机械强度,变压器油温也会升高,严重情况下会引发变压器着火<sup>[9]</sup>。文中从物理角度提出了短路电流、短路持续时间与导体温升的关系,见式(1)、(2)。

$$W = Pt; \quad (1)$$

$$\Delta T = \frac{W}{cpV} = \frac{Pt}{cpV}。 \quad (2)$$

式(1)-(2)中: $W$ 为导体短路时吸收能量; $I$ 为短路电流; $t$ 为短路持续时间; $\Delta T$ 为导体温升; $c$ 为导体比热容; $p$ 为导体电阻率; $V$ 为导体密度。

由式(2)可知,导体温升与短路电流的平方呈正比,短路持续时间越短,温升呈平方变化趋势越小。

### 2.3 动稳定分析

变压器在正常情况下电动力不大,受到短路电流冲击时,电动力剧增,极有可能造成变压器损坏<sup>[20]</sup>。短路过程中电流是持续变化的,绕组在电动力的作用下,发生形变位移造成匝间绝缘水平下降,直至匝间短路发生。文中提出了导体位移与短路电流、短路持续时间的关系,见公式(3)-(7)。

$$s = \frac{1}{2}at^2; \quad (3)$$

$$a = \frac{F(I) - F(s)}{M}; \quad (4)$$

$$F(I) = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 K_c; \quad (5)$$

$$F(s) = K \times s; \quad (6)$$

$$s = \frac{A I^2}{2M \frac{1}{\tau^2} + K} t。 \quad (7)$$

式(3)-(7)中: $s$ 为导体位移; $a$ 为导体在电动力下变形位移加速度; $F(I)$ 为电动力; $F(s)$ 为绕组形变时产生的阻力; $K$ 为导体的弹性模量; $M$ 为导体质量; $A$ 为系数, $A = \frac{\mu_0}{2\pi M} K_c$ ;  $K_c$ 为回路系数。

由式(3)-(7)可知,绕组的形变位移大小与短路电流的平方呈正比,短路持续时间越短,形变位移呈平方变化趋势越小。

由式(3)-(7)分析可知,变压器能承受的短路动

稳定能力与短路电流大小和短路持续时间有关。

### 3 基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力应用分析

如果通过改变变压器内部构造强度的方法提升变压器抗短路能力,对在运行的变压器来说不现实。由动稳定公式推导可知,深度限制短路电流,并将短路持续时间缩短,可以有效地降低短路电流冲击造成变压器绕组的动热效应,实际上是变向提升了变压器抗短路冲击能力。尤其是减小短路冲击时变压器绕组造成的形变量,一旦被控制在导体的弹性形变范围内,就意味着该变压器可多次承受短路冲击,极大地延长变压器的使用寿命。零损耗深度限流技术能将短路持续时间大幅度减少到 20 ms,能将短路电流限制在可靠范围内。

#### 3.1 基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力应用基本原则

文中提出了基于零损耗深度限流技术提升变压器抗短路能力应用原则:以快速将变压器出口短路电流限制到  $k\%$  为目标;以 20 ms 内成功限制及限制深度一般大于 50% 为参数指标;应以全范围保护为考虑要点。其中,  $k\%$  为通过评估的短路电流限制比例上限。

#### 3.2 零损耗深度限流电抗器参数计算分析

##### 3.2.1 系统计算模型

根据应用原则将变压器出口短路电流限制到  $k\%$ ,设  $X_0$  为系统侧阻抗值,  $X_1$  为安装的零损耗深度限流电抗器阻抗,  $U$  为系统电源,计算模型见图 3。

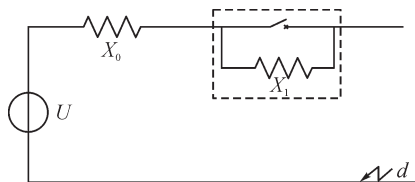


图3 深度限流计算模型图

Fig. 3 Depth limit calculation model

根据图 3 可知,系统发生短路故障时,短路电流  $I$  为

$$\frac{U}{X_0} = I. \quad (8)$$

安装零损耗深度限流装置后,将短路电流限制到  $k\%$ ,则深度限流电抗器的阻值  $X_1$  为

$$\frac{U}{k\%I} = X_0 + X_1. \quad (9)$$

##### 3.2.2 计算分析

以中山小榄小山线 110 kV 为例,  $d_1$  处发生短路,短路电流  $I_{k1}$  为 17.44 kA,  $d_2$  处发生短路,短路电

流  $I_2$  为 34.34 kA,线路图见图 4。

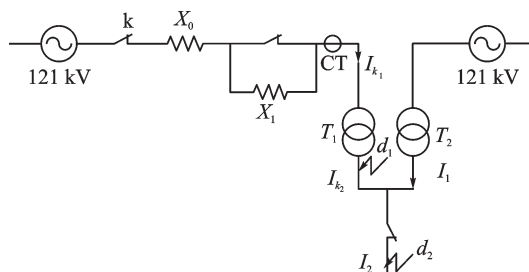


图4 中山小榄小山线

Fig. 4 Zhongshan Xiaolan of hill line

按照客户的需要把  $d_2$  侧的短路电流加以限制,限制到 90%,则限制电流为:  $I_2 = 90\% \times I_2 = 28.35$  kA;  $I_{k1} = I_2 - I_1 = 11.45$  kA。

$I_{k1}$  折算到高压侧电流  $I'_{k1}$  为 1.093 0 kA,  $I_{k1}$  折算到高压侧电流  $I_{k1}$  为 1.664 7 kA。

$T_1$  变压器的容量  $SN$  为 50 MVA, 短路阻抗  $X_T$  为 34.1  $\Omega$ , 220/110 变压器线路等效阻抗  $X_0$  为

$$\frac{U}{I_{k1}} = X_T + X_0. \quad (10)$$

为限制线路的短路,加装的限流电抗器  $X_1$  为

$$\frac{U}{I_{k1}} = X_T + X_0 + X_1. \quad (11)$$

式(11)中,  $X_0$  为 7.865  $\Omega$ ;由式(11)可知,  $X_1$  取值 22  $\Omega$ 。

根据上述零损耗限流电抗器参数计算的过程,即可求出所需的零损耗限流电抗器参数,进一步把短路电流限制在预期内。

#### 3.3 算例分析

根据应用原则,将变压器出口短路电流限制到 29%,在 20 ms 内成功限制并且限制深度大于 50%,建立了仿真结构图见图 5。并在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型,见图 6。

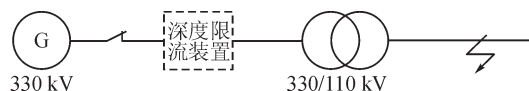


图5 仿真结构图

Fig. 5 The simulation diagram

变压器出口处短路电路见图 7,加入限流装置后变压器出口处短路电流见图 8。从图 7 可以看出,系统在 19 ms 时发生短路,变压器出口处电流由原来的近 900 A 骤增到 133 kA 左右,是正常电流的 14.8 倍,短路电流持续了 50 ms,电动力剧增,极有可能造成变压器损坏。绕组在电动力的作用下,发生形变位移。从图 8 中可以看出,在系统中安装零损耗深度限流装置后,变压器出口处短路电流下降为 3.9 kA 以下,是原来短路电流的 29%,将短路持续时间大幅度减少到 20 ms,并且限制深度为 71%,

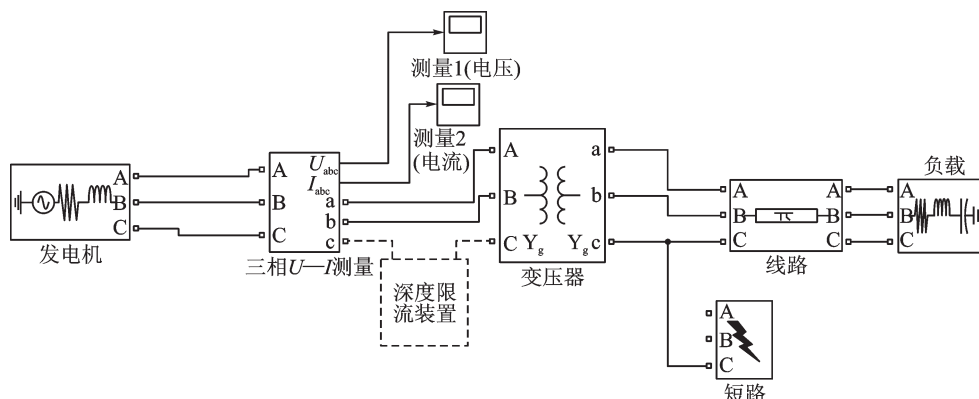


图6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

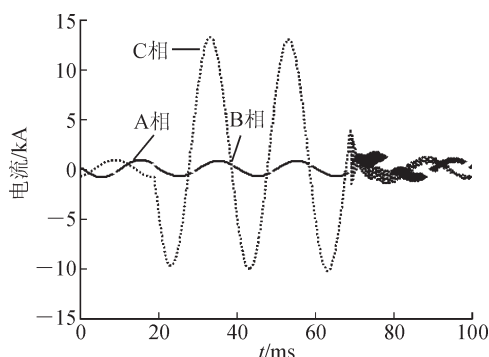


图7 变压器出口处短路电流

Fig. 7 Transformer short-circuit current at the exit

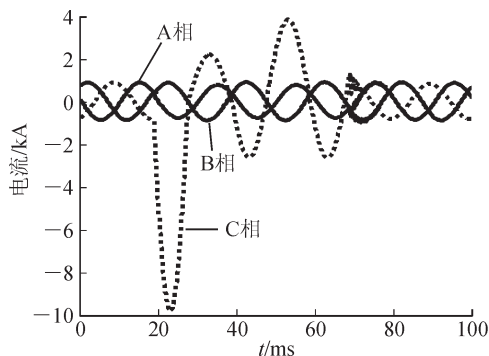


图8 加入限流装置后变压器出口处短路电流

Fig. 8 Short circuit current at the outlet of the

transformer after adding the current limiting device

短路电流下降了71%,电动力降低了50%,这样,电动力注入到变压器的能量可减少30%,实际上是减少短路故障对变压器的冲击效应,加大了变压器抗短路能力的裕度,变向提升变压器的抗短路冲击能力,这种方法相对更换变压器更经济、更适用。

### 3.4 应用情况

广东中山某地区于2012年底在220 kV变电站3号主变压器35 kV侧出口安装零损耗深度限流装置并投入运行,流过主变压器的短路电流下降了45.74%,相较于更换变压器或加装普通限流器,每年电能损耗减少了9 496.86 MW·h,经济损失减少了474.84万元<sup>[9]</sup>。2013年4月7日,10 kV零损耗

深度限流装置调试完毕并在重庆某地区110 kV上桥变电站投入运行,且运行良好,相较于更换变压器或加装普通限流器,流过主变压器的短路电流下降了48.3%,每年电能损耗减少了3 072 MW·h,经济损失减少了153.6万元<sup>[9]</sup>。

通过上述分析可知,相较于加装普通限流器或者更换变压器,该方法更经济、更节能。

## 4 结论

1)分析了零损耗深度限流技术工作原理和变压器抗短路能力下降原因,并在MATLAB/Simulink中搭建了零损耗深度限流装置提高变压器抗短路能力的仿真模型。仿真结果验证了该方法能快速的将变压器出口处短路电流成功限制在20 ms内,并且限制深度大于50%,电动力下降,提高了变压器抗短路能力。

2)分析了零损耗深度限流装置在电力系统中应用情况,证明了该方法相较于更换变压器或者加装普通电流器更经济,更节能。

## 参考文献:

- [1] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社,2009.  
ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system relay protection[M]. Beijing China Electric Power Press, 2009.
- [2] 刘爽. 大型电力变压器绕组短路强度计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.  
LIU Shuang. Calculation and analysis on the windings short-circuit strengthening large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang university of technology, 2007.
- [3] 陈少宏. 内蒙古电网大型变压器抗短路能力计算与评估研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2016.  
CHEN Shaohong. Calculation and evaluation of anti short circuit capacity of large transformers in inner mongolia power grid[D]. Changchun: Changchun University of Technology,

- 2016.
- [4] 查银芳. 变压器绕组短路电动力计算分析及抗短路能力的研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2014.
- CHA Yinfang. Calculation and analysis on short-circuit force of transformer winding and study on the ability of withstanding short-circuit[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2014.
- [5] 姜益民. 变压器抗短路能力简析[J]. 变压器,2002,39(4):26-31.
- JIANG Yimin. Short circuit capacity of transformer[J]. Transformer,2002,39(4):26-31.
- [6] 阎东生. 提高变压器抗短路能力[J]. 农村电气化,2010(7):55-56.
- YAN Dongsheng. To improve the anti short circuit ability of the transformer[J]. Rural Electrification,2010(7):55-56.
- [7] 王梦云. 2002—2003年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(一)[J]. 电力设备,2004,5(10):22-26.
- WANG Mengyun. Statistics and analysis of transformer equipment accidents in the system of state power grid corp from 2002 to 2003(a)[J]. Electric Power Equipment,2004,5(10):22-26.
- [8] 赵志刚,李光范,李金忠,等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3214-3220.
- ZHAO Zhigang,LI Guangfan,LI Jinzhong,et al. Analysis of anti short circuit capacity of large power transformers based on finite element method[J]. High Voltage Technology,2014,40(10):3214-3220.
- [9] 黄永宁,艾绍贵,李艳军,等. 快速真空断路器在限流技术中的应用[J]. 宁夏电力,2014(6):18-23.
- HUANG Yongning,AI Shaogui,LI Yanjun,et al. Application of fast vacuum circuit breaker in current limiting technology[J]. Ningxia Electric Power,2014(6):18-23.
- [10] 艾绍贵,马奎,吴旭涛,等. 快速真空断路器在电力系统中的应用[J]. 电工电气,2016(5):1-6.
- AI Shaogui,MA Kui,WU Xutao,et al. Application of fast vacuum circuit breaker in electric power system[J]. Electrical and Electric,2016(5):1-6.
- [11] 吴晓腾. 基于快速开关的节能型故障限流器关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.
- WU Xiaoteng. Research on key technologies of energy-saving fault current limiter based on fast-switch[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [12] 杨智,张立军. 零损耗深度限流装置在煤化工中的应用[C]//长三角能源论坛,2015:315-319.
- YANG Zhi,ZHANG Lijun. Application of zero loss depth limiting device in coal chemical industry[C]//Yangtze River Delta Energy Forum,2015:315-319.
- [13] 宫志坚. 零损耗深度限流装置在厂用电系统中的应用[J]. 泰州职业技术学院学报,2016,16(2):53-56.
- GONG Zhijian. Application of zero depth limiting device in the factory power system[J]. Journal of Taizhou Polytechnic College,2016,16(2):53-56.
- [14] 程艳兵,汪志鹏,祁福. 零损耗深度限流装置的优化与运用[J]. 铜业工程,2012(4):41-44.
- CHENG Yanbin,WANG Zhipeng,QI Fu. Optimization and application of zero loss depth limit device[J]. Copper Project,2012(4):41-44.
- [15] 陈丽莉. 大电网限流措施的优化配置研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- CHEN Lili. Study on optimal allocation of limited current measures in large power grid[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2011.
- [16] 王中龙. 限流器在变压器低压侧的应用研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- WANG Zhonglong. Research and application of fault current limiter in low voltage side of transformer[D]. Jinan:Shandong University,2013.
- [17] 艾绍贵,高峰,黄永宁,等. 330 kV 开关型零损耗故障限流装置的研制及人工短路试验[J]. 智能电网,2015(4):354-359.
- YI Shaogui,GAO Feng,HUANG Yongning,et al. Development and short-circuit experiment of 330 kV switch-type no-loss fault current limiter[J]. Journal of Smart Grid,2015(4):354-359.
- [18] BERTAGNOLLI G. Short-circuit performance of transformers[R]. [S.l.]: CIGRE,1999.
- [19] JANSSEN A L J,PASKE L H. Short-circuit testing experience with large power transformers[C]//International Council on Large Electric Systems(CIGRE). France: CIGRE,2000:12-105.
- [20] 张丙旭. 提高变压器承受短路能力的实验研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.
- ZHANG Binxu. Experimental study on improving the short circuit withstand ability of transformer[D]. Baoding:North China Electric Power University,2010.

李新海(1971—),男,工学学士,高级工程师,主要从事电力系统及自动化的研究及变电设备运行管理工作。