

取能电源线圈气隙宽度的影响分析

林杰¹, 刘刚¹, 张鸣²

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东电网公司佛山供电局, 广州 528000)

摘要: 为了优化取能电源装置, 通常在取能线圈中引入气隙磁阻, 减少其中的磁通量。研究了气隙宽度对感应电压幅值等其他参数的影响。根据感应取能的基本原理, 对不同气隙下感应电压的变化规律进行计算, 并通过试验平台试验验证, 得出关于气隙宽度对线圈感应电压影响的结论。根据此试验结果, 可对不同架空导线电流范围, 合理调整取能电源的线圈气隙宽度, 使得电源有足够的稳定输出电压。

关键词: 取能电源; 取能线圈; 气隙磁阻; 气隙宽度

中图分类号: TM91

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2012)12-0075-05

Impact Analysis for the Air-gap Width of Draw-out Power Supply Coil

LIN Jie¹, LIU Gang¹, ZHANG Ming²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Pawan Grid Corporation, Foshan 528000, China)

Abstract: In order to optimize coil of the draw-out power supply, usually the introduction of air-gap reluctance in draw-out power coil can reduce magnetic flux of the coil. In this article the impact of air-gap width on induced voltage and other parameters has been researched. According to the basic principles of draw-out power, variation of induced voltage under different air-gap is calculated and it is verified through experiment platform. The conclusion about the influence of air-gap width on coil induced voltage has been got. Base on the results of this experiment, it can make output voltage of the power supply more stability by adjust the air-gap width according to the result of the experiment.

Key words: draw-out power supply; draw-out power coil; air-gap reluctance; air-gap width

0 引言

近年来, 在线监测系统的电源是监测系统实用化的一个关键问题^[1]。目前常应用的供电方式主要有太阳能供电^[2-3]、母线感应取能^[4]、激光供能^[5]等。由于在线监测系统需长期工作在架空线路上, 需要长期免维护。太阳能供电和激光供能虽然供电能源来自电网外部, 不受电网干扰, 但是受光转换效率低的限制, 且成本高, 目前无法普遍使用^[6]。母线感应取能即在导线上套装取能线圈将导线能量转换到二次侧, 实现隔离式供电, 可靠性高, 实用性强, 是目前最有前景的供电方式^[7-8]。对高压侧装置供电电源的研究具有重要的实用价值^[9-10]。

在目前感应取能的电源中, 为了避免线圈的深

度饱和, 相应地加入了控制电路、补偿电路等调节线圈工作的状态的复杂电路^[11], 使得电源电路复杂化, 降低可靠性。笔者在对一些实际在线监测系统感应取能电源的产品进行试验时, 出现不同程度的线圈振动, 由于线圈处于深度饱和状态时, 铁心损耗增加, 导致线圈振动。文[1]通过引入气隙磁阻来减小饱和和以增大电流适用范围, 但大多只是对气隙的影响进行定性分析, 在实际应用中难有较实用的参考价值。因此, 定量分析气隙宽度对感应电压的影响, 是目前亟待解决的关键问题。

针对此问题, 对同一线圈的不同气隙宽度下, 二次侧线圈所感应的电压、功率以及取能电源的启动电流和饱和电流进行计算及比较, 并通过试验验证, 得出气隙宽度对二次侧感应电压的影响程度。通过试验结果, 可针对不同的电流范围及输出功率

要求,合理选择线圈的气隙宽度提供一定的实用参考依据。

1 输电线路取能电源的工作原理

输电线路取能电源的基本框图见图1。

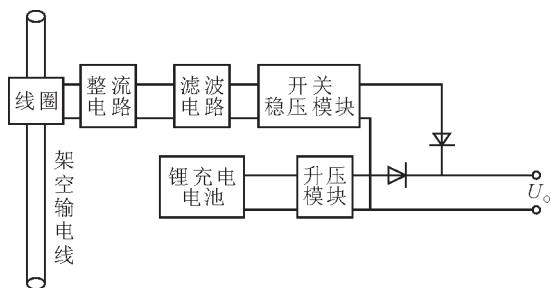


图1 取能电源的基本框图

Fig. 1 Basic blocks of draw-out power supply

取能电源的供电方式主要是利用电磁感应原理,通过闭合的线圈从高压母线上感应出工频的交流电压,然后经过整流、滤波、稳压后为后续电路供电^[12-15]。根据电磁理论的相关知识^[16-17],在感应取能线圈的二次侧端空载情况下,一次侧由工频交流电流控制,假设二次侧输出电压的有效值为 U_2 ,则

$$U_2 \approx E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1)$$

式(1)中: E_2 为二次侧感应电动势有效值; f 为频率,通常为50 Hz; N_2 为二次侧线圈匝数; Φ_m 为磁通量。

$$\Phi_m = B_m S \lambda \quad (2)$$

式(2)中: B_m 为磁感应强度幅值; S 为铁心截面积; λ 为铁心叠片系数。由安培环路定律得

$$H_m l = \sqrt{2} N_1 I_E \quad (3)$$

式(3)中: H_m 为磁场强度幅值; l 为平均磁路长度; I_E 为励磁电流,空载情况下等于一次侧导线电流 I_1 ; N_1 为一次侧匝数,这里取1。磁感应强度幅值与磁场强度幅值的关系为

$$B_m = \mu_0 \mu_r H_m \quad (4)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (5)$$

式(4)、(5)中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; μ 为磁导率。

此外,铁心磁路感应出来的磁动势 F 等于磁通量和闭合磁路磁阻的乘积,即

$$F = \Phi_m \cdot R_m \quad (6)$$

式(6)中: $F=Ni$ 为磁路的磁动势; $R_m=l/(\mu A)$ 为磁路的磁阻,它取决于磁路的尺寸和磁路的所用材料的磁导率,其中 A 为线圈横截面积。

根据磁性材料的磁化曲线,大致可以分为3个区间:起始区、线性区和饱和区^[18]。在起始区和线性区中,磁感应强度 B 都随磁场强度 H 的增大而增

大,且近似成线性关系,比例系数为磁导率 μ 。在饱和区,磁性材料出现饱和现象,即当磁场强度幅值 H 增大时,磁感应强度幅值 B 不随之增大,因此感应电压 U_2 也不随之增大。当线圈处于过度饱和时,二次侧感应电压波形将发生严重畸变,近似成为尖顶波。感应电压的有效值基本不变,但瞬时峰值急剧增大,甚至可达到有效值的几十倍,(以LGJ-240/30为例,电流为500 A时,感应电压有效值为23.2 V,但瞬时峰值达到1.43 kV)对后续电路的元器件的耐压提出了很高要求。

此外,线圈长期工作在过度饱和的状态会导致:①铁心损耗居高不下,输出效率低;②主磁通过大,线圈受安培力不均,引起高频振动;③线圈温升过高,甚至有可能烧坏铁心。

2 气隙宽度对取能电源的影响

2.1 线圈材料的选择

针对短路故障等大电流的情况导致铁心过度饱和的问题,可以优先从对铁心材料的选择来解决。首先,在弱磁场作用下,磁感应强度 B 的增量主要取决于材料的初始导磁率。为了增大线路低负载情况下二次侧的感应电压,需要选择初始导磁率较高的铁心材料。其次,铁心材料的饱和程度主要取决于最大导磁率,应尽量选择最大磁导率较高的铁心材料。最后,为了满足安装以及经济性的要求,选择铁心叠片少的材料,减少材料的重量。

以上选取铁基纳米晶、坡莫合金和硅钢片这3种材料,从磁感应强度、初始磁导率、最大磁导率、叠片系数进行对比^[15,19-21],结果见表1。

表1 铁磁材料对比

Tab. 1 Compare of ferromagnetic materials

基本参数	铁基纳米晶	坡莫合金	硅钢片
饱和磁感应强度 B_s/T	1.25	0.76	2.03
初始导磁率 $/(G_s \cdot \text{Oe}^{-1})$	$(4\sim 8) \times 10^4$	$(5\sim 8) \times 10^4$	10^3
最大导磁率 $/(G_s \cdot \text{Oe}^{-1})$	$>2 \times 10^5$	$>2 \times 10^5$	4×10^4
铁心叠片数	>0.70	0.90	0.95

在一次侧电流、匝数、磁通面积均不变的条件下,由式(1)~(6)可知,提高最大磁导率是减小铁磁材料饱和的有效方法。由表1可知,传统导磁材料(如硅钢片)的饱和磁通密度虽较高,但初始磁导率比较低,在弱磁场状态下,感应电压较低;铁基纳米晶材料比传统磁导材料的初始磁导率提高了约40倍,在弱磁场中,可以提高二次侧的感应电压。铁基纳米晶和坡莫合金的最大导磁率都远大于硅钢片材料,有效减小铁心饱和的程度。此外,铁基纳米晶铁

心叠片系数较小,所以同等体积下,重量比坡莫合金要轻,且价格也明显低于坡莫合金。因此,选择这种材料能够保证铁心在一次侧电流较大的情况下不饱和,铁心损耗小,提高了能量传递的效率,符合感应取能的基本要求。

除此之外,可以从铁心内部对二次侧感应电压的影响因素进行分析。由于装置的结构以及工作的频率保持不变,根据式(1)可知,在二次侧匝数 N_2 和频率 f 不变的前提下,二次侧感应电压 U_2 的有效值主要是由磁路主磁通量 Φ_m 所决定的。

根据式(2)可知,线圈磁路主磁通与二次侧感应电压保持良好的线性关系。因此,可以通过调节线圈磁路的主磁通的大小,达到控制感应电压的幅值,进一步延缓大电流情况下铁磁材料的饱和程度。

由式(2)可知,线圈磁路主磁通量 Φ_m 主要由磁感应强度 B 和铁心截面积 S 这两个因素来决定。因此,可以通过选择横截面积相对较大的铁心的方法,增大磁路的总磁通量,从而减小二次侧感应电压的幅值。但是由于受到铁心尺寸的限制,加上截面积对于主磁通量的影响甚微,以及出于运输安装和经济性方面的考虑,故不采用此方法进行调节。

文[11]中提出通过引入气隙磁阻的方法来改变线圈磁路的总磁阻,从而达到控制主磁通量的目的。其可操作性高,可靠性强,成本低,但大多都只对其进行定性分析和特定的设计,无可参考的实际应用价值。因此,研究气隙宽度对感应电压的影响,为今后的工程应用提供了参考依据。

2.2 气隙宽度对感应电压的影响

由于线圈磁路的磁动势主要由一次侧决定,由 $F=Ni$ 可知,在某一时刻,当通过一次侧的电流 i 保持不变时,磁路的总磁动势 F 也将保持不变。由式(6)可知,在一次侧通过大电流时,要减小铁心的饱和程度,即减少线圈磁路的主磁通量 Φ_m ,可采用增大磁路磁阻的方法来实现。又因为空气的磁导率远比任何磁性材料的小得多,因此相同宽度的空气磁阻远比铁基纳米晶材料要大的多,即 $R_g \gg R_{Fe}$ 。因此,增加一定宽度气隙对感应电压有很大的影响。

3 试验分析

3.1 理论计算及仿真

通过对表1的3种磁性材料的比较,选择初始磁导率和最大磁导率高的铁磁材料,能尽量降低启动电流。除此之外,在满足后续电路所需功率的前提下,要尽量减小铁心的体积和重量。选定铁基纳

米晶的矩形型铁心磁路长=57.5 mm,宽=42.5 mm,高度 $h=32$ mm,则平均磁路长度 $l \approx (57.5+42.5) \times 2 = 200$ mm。

在一次侧电流为 50 A,一次侧对地电压为 220 V,装置空载的情况下,分别取气隙宽度 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 分别为 0.3、0.6、0.9 mm;选定二次侧匝数为 150 匝,则由式(1)、(2)得

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f N_2 B_m S \lambda \quad (7)$$

由安培环路定理得

$$H_\delta \cdot l_\delta + H_{Fe} \cdot l_{Fe} = \sqrt{2} N_2 I \quad (8)$$

$$B_m = \mu_0 \mu_{Fe} H_{Fe} = \mu_0 \mu_\delta H_\delta \quad (9)$$

式(8)、(9)中: I 为一次侧电流有效值; $\mu_\delta = 1$; $l_{Fe} = 200$ mm; l_δ 分别取 0.3、0.6、0.9 mm,则有

$$U_2 \approx E_2 = 4.44 f N_2 S \lambda \mu_0 \mu_{eq} \frac{\sqrt{2} I}{l} \quad (10)$$

运用 MATLAB 对上述理论计算结果进行仿真。根据式(10)绘制不同气隙宽度情况下,二次侧感应电压与一次侧电流之间的变化关系见图2。

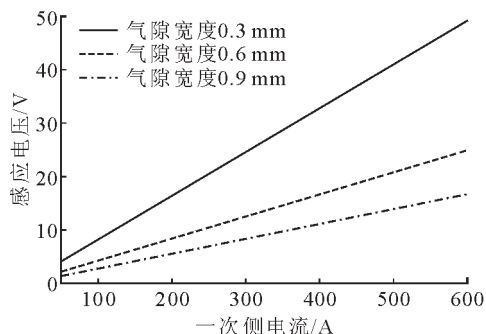


图2 不同气隙宽度感应电压随电流变化的理论曲线

Fig. 2 Theoretical curves of induced voltage and current when width of air-gap changes

在实际应用中,铁心一般不工作在饱和区,所以在理论计算时,为了简化模型,没有考虑铁磁材料饱和的情况,因此绘制出的曲线呈线性关系。但从图1中仍然可以看出:在相同电流变化下,随着气隙宽度的增大,感应电压也相应的减少。

当感应电压高于所需输出电压 5 V 时,装置输出电压自动转为二次侧感应电压,此时一次侧电流即为装置启动电流。从图1中可以看出,当气隙为 0.3 mm 时,启动电流为 67 A;当气隙为 0.6 mm 时,启动电流为 127 A;当气隙为 0.9 mm 时,启动电流为 171 A。

3.2 试验验证

建立试验平台见图3,调压器一端接 220 V 工频交流电,另一端通过升流器连接架空导线 LGJ-240/30。通过调节调压器,可以对架空线路,加载不同大小的电流测量装置启动电流以及饱和电流。

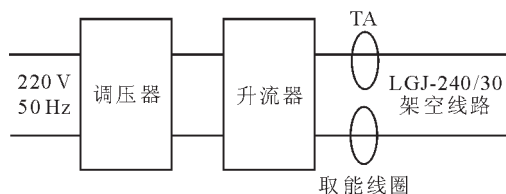
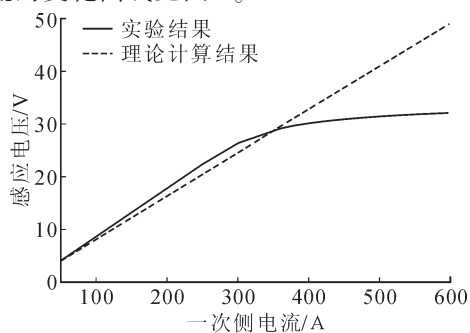


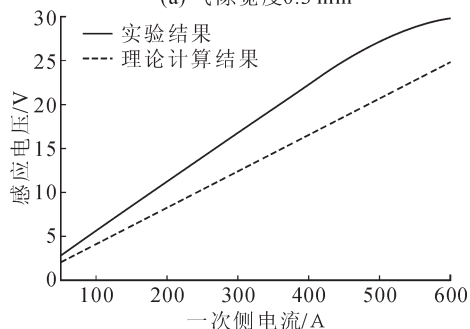
图3 试验平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment platform

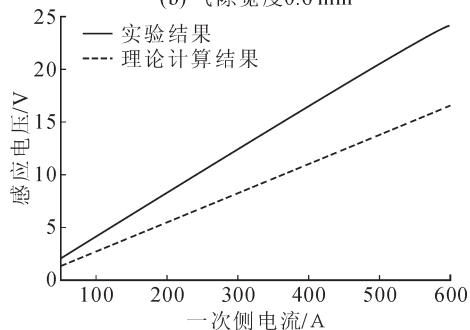
对取能线圈的感应电压进行空载试验。假定一次侧电流为 50 A, l_0 分别取 0.3、0.6、0.9 mm 时, 由式(10)所计算出的感应电压值分别为: 4.09、2.06、1.38 V。而在试验中, 得出的二次侧感应电压值分别为: 4.08、2.76、2.06 V。不同气隙宽度情况感应电压随电流的变化曲线见图 4。



(a) 气隙宽度0.3 mm



(b) 气隙宽度0.6 mm



(c) 气隙宽度0.9 mm

图4 不同气隙宽度情况感应电压随电流的变化曲线

Fig. 4 Compare between theoretical and experimental curves of induced voltage and current when width of air-gap changes

从图3中不难看出, 在上述3种不同气隙宽度下, 二次侧感应电压的理论计算结果接近于实际结果。其中的差值是由于引入气隙磁阻后, 线圈磁路

的漏磁通增加, 对感应电压的影响增加所导致的。

在相同电流变化下, 空载感应电压有效值随着气隙宽度的增加而下降见图5。从图5中可以看出, 在一次侧电流升至 600 A 过程中, 当气隙宽度为 0.3 mm 时, 取能线圈启动电流为 62 A, 饱和电流约为 330 A; 当气隙宽度为 0.6 mm 时, 线圈启动电流为 87 A, 饱和电流约为 570 A; 当气隙宽度为 0.9 mm 时, 线圈启动电流为 119 A, 饱和电流大于 600 A。不同气隙感应电压有效值对比见表2。

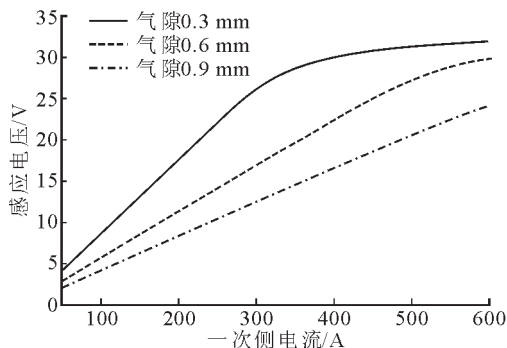


图5 不同气隙宽度的试验结果

Fig. 5 Experimental results of different width of air-gap

表2 不同气隙感应电压有效值对比

Tab. 2 Compare of induced voltage when different width of air-gap

电流/A	50	300	600
无气隙	12.45	31.37	27.93
气隙 0.3 mm	4.08	26.15	31.90
气隙 0.6 mm	2.76	16.75	29.87
气隙 0.9 mm	2.06	12.33	24.12

由此可以证明, 增加气隙的宽度, 线圈感应电压的幅值将会下降。从表2中可以计算出, 在 50 A 电流时, 气隙 0.3 mm 的感应电压比无气隙时减小 8.37 V, 减小幅度达 67.23%; 气隙 0.6 mm 比无气隙下减小 9.69 V, 减小幅度达 77.83%; 气隙 0.9 mm 比无气隙时减小 10.39 V, 减小幅度达 83.45%。

同时, 随着气隙宽度的增加, 线圈启动电流增加, 饱和电流也相应增加。

4 结论

为了优化在线取能电源, 在线圈中引入气隙磁阻, 以解决感应取能电源在大电流情况下线圈过度饱和的问题。同时深入研究气隙磁阻对取能电源的影响程度而进行试验, 从试验数据中得到:

1) 3种不同气隙宽度下, 一次侧电流为 50 A, 一次侧电压为 220 V 时, 二次侧感应电压的有效值随气隙宽度的增加而减小。当一次侧电流为 50 A, 气隙 0.9 mm 时感应电压下降最多, 下降幅度达

83.45%, 气隙 0.3 mm 时感应电压下降最少, 下降幅度也达到 67.23%。

2)3 种不同气隙宽度下, 一次侧电流为 50 A, 一次侧电压为 220 V 时, 取能电源装置启动电流以及线圈饱和电流随气隙宽度的增加而增加。

参考文献:

- [1] 李先志, 杜林. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-77.
LI Xian-zhi, DU Lin. A novel scheme of draw-out power supply utilized in transmission line state monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 76-77.
- [2] 钱政. 有源电子式电流互感器中高压侧电路的供能方法[J]. 高压电器, 2004, 40(2): 135-137.
QIAN Zheng. Power supply for high voltage circuit of active electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(2): 135-137.
- [3] 唐旭晖, 完保娟, 张景超, 等. 光电电流互感器高压端供能电源的设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 123-125.
TANG Xu-hui, WAN Bao-juan, ZHANG Jing-chao, et al. Design of power supply for optical current transformer in high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 123-125.
- [4] 刘丰, 高迎霞, 毕卫红. 电子式电流互感器高压侧供能方案的研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 72-75.
LIU Feng, GAO Ying-xia, BI Wei-hong. Power supply of high voltage side of electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 72-75.
- [5] 段雄英, 吕斌, 邱红辉. 高压 ECT 中激光供能电源的设计[J]. 高压电器, 2006, 42(6): 428-431.
DUAN Xiong-ying, LÜ Bin, QIU Hong-hui. Design of optical power supply for high voltage ECT[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6): 428-431.
- [6] 张曦, 张庆伟, 张源斌. 混合式 OCT 高压侧电路的供电方式[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 14-15.
ZHANG Xi, ZHANG Qing-wei, ZHANG Yuan-bin. Solutions of power supplies for high voltage circuit of hybrid optical current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 14-15.
- [7] 郭琳云, 尹项根, 严新荣, 等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 217-221.
GUO Lin-yun, YIN Xiang-gen, YAN Xin-rong et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 217-221.
- [8] 阳光, 刘欣荣. 有源电子式电流互感器高压侧电路设计的改进[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 81-84.
YANG Guang, LIU Xin-rong. Improvements on circuit design for high-voltage side of active power electronic current transducer[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 81-84.
- [9] 高迎霞, 毕卫红, 刘丰. 电子式电流互感器高压端供能电源的设计[J]. 电力电子技术, 2007, 41(10): 74-76.
GAO Ying-xia, BI Wei-hong, LIU Feng. Design of power of electronic current transformer in high voltage side[J]. Power Electronics, 2007, 41(10): 74-76.
- [10] 辛业春, 王滨, 杜长军. 一种应用于高电压侧测量系统的取能电源设计[J]. 吉林电力, 2010, 38(4): 24-26.
XIN Ye-chun, WANG Bin, DU Chang-jun. A design of draw-out power coil in high voltage electronic system[J]. Jilin Electric Power, 2010, 38(4): 24-26.
- [11] 李芙英, 朱小梅, 纪昆, 等. 一种应用于高电压侧测量系统中电源[J]. 高电压技术, 2002, 28(3): 46-47.
LI Fu-ying, ZHU Xiao-mei, JI Kun, et al. The power supply of optic electric current transducer[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(3): 46-47.
- [12] 胡彬, 周有庆. 电子式电流互感器高压侧电源的研究与实现[J]. 电气应用, 2006, 25(5): 99-102.
HU Bin, ZHOU You-qing. Research and design of the high potential circuit power supply for electronic current transformer[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(5): 99-102.
- [13] 秦欢. 高压测量系统感应取能电源设计[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 32-36.
QIN Huan. Design of induced power apparatus for high voltage measuring system[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(5): 32-36.
- [14] 王赞, 纵飞. 输电线路高电位取能电源的研制[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(6): 23-27.
WANG Zan, ZONG Fei. Development of power supply in high voltage side of transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 23-27.
- [15] 胡彬. 电子式电流互感器高压侧电源的研究与设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
HU Bin. The research and design of the high potential circuit power supply for electronic current transformer[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [16] 邱关源. 电路[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
QIU Guan-yuan. Circuit [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [17] 汤蕴缪. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
TANG Yun-miu. Electric machinery [M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [18] 付烈. 混合式光纤电流互感器电源的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2004.
FU Lie. Research on power supply of hybrid fiber current transducer[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2004.

(下转第 85 页)

- pment supervision and maintenance guidance[S].
- [5] IEEE Std C57.106—2006. IEEE guide for acceptance and maintenance of insulating oil in equipment[S].
- [6] OKUBO H, KOBAYASHI S, AOSHIMA Y, et al. Electrical insulation diagnostic method and maintenance criteria for oil-immersed power transformers [C]//IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, ICDL, Nara: IEEE, 1999: 372-377.
- [7] GOTO K. Measurement of winding temperature of power transformers and diagnosis of aging deterioration by detection of CO and CO₂ [R]. Paris: GIGRE, 1990.
- [8] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器绝缘老化的诊断与寿命评估[J]. 变压器, 2004, 21(4): 14-17.
YANG Qi-ping, XUE Wu-de, LAN Zhi-da. Aging diagnosis and expected life assessment for transformer insulation[J]. Transformer, 2004, 21(4): 14-17.
- [9] PRADHAN M K, RAMU T S. On the estimation of elapsed life of oil-immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 1962-1969.
- [10] 郭永基. 中小容量电力变压器寿命评估的新方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 38-41.
GUO Yong-jie. New methodology for lifetime evaluation of medium and small sized power transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21): 38-41.
- [11] DL/T 596—1996. 电力设备预防性试验规程[S].
DL/T 596—1996. Preventive test code for electric power equipment[S].
- [12] 刘玉仙. 油纸绝缘变压器中水分的聚积及其对热老化寿命的影响[J]. 变压器, 2004, 41(02): 8-12.
LIU Yu-xian. Water accumulation in oil-paper insulation transformer and its influence to life time[J]. Transformer, 2004, 41(2): 8-12.
- [13] IEEE Std C57.106—2006. IEEE guide for acceptance and maintenance of insulating oil in equipment[S].
- [14] OKABE S, KANEKO S, KOHTOH M. Analysis results for insulating oil components in field transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1): 302-311.
- [15] WANG A J, VANDERMAAR K D, SRIVASTAVA M. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [16] GB/T 7252—2001. 变压器油中气体分析和判断导则[S].
GB/T 7252—2001. Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil[S].
- [17] 杜林, 袁蕾, 熊浩, 等. 应用蒙特卡罗模拟法的电力变压器热特性绝缘寿命评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 856-861.
DU Lin, YUAN Lei, XIONG Hao, et al. Insulation life assessment of power transformer thermal characteristics using monte carlo simulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4), 856-861.
- 李喜桂(1965—), 男, 高级工程师, 主要从事变电专业状态检修、资产全寿命周期管理等工作。

(上接第 79 页)

- [19] 彭韬, 须雷. 电子式电流互感器高压侧电源的研制[J]. 变压器, 2010, 47(5): 5-7.
PENG Tao, XU Lei. Development of HV side power supply for electronic current transformer[J]. Transformer, 2010, 47(5): 5-7.
- [20] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.
REN Xiao-dong, CHEN Shu-yong, JIANG Tao. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71.
- [21] 陈洁. 电子式电流互感器高压侧电源的设计[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
CHEN Jie. Design of power supply forelectric current transformer on high voltage side[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007.
- 林杰(1988—), 男, 硕士生, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断。
- 刘刚(1969—), 男, 博士后, 副教授, 硕导, 国际电气电子工程师协会(IEEE)会员, 主要研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、过电压及其防护、输变电外绝缘特性。
- 张鸣(1974—), 男, 硕士, 高工, 主要研究方向为高压输电线路技术管理。