

DOI: 10.7667/PSPC201643

智能配电变压器的串变调压和基于漏磁的 绝缘故障检测技术

金贵阳^{1,2}, 杨克己², 戴永军³, 马尚行³

(1. 浙江水利水电学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310027;
3. 浙江嘉科新能源科技有限公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 为了解决分布式能源接入配电网后电压的频繁波动和双向潮流问题, 提出一种基于串联变压器的调压技术。利用真空接触器和晶闸管来控制串联变压器的变比和星-角变换, 实现电压的快速调整。分析了基于串联变压器的调压原理及基于真空接触器和晶闸管的混合开关调压技术。此外, 还提出了基于漏磁通的绕组绝缘故障监测技术, 说明它的原理、实现技术和实验验证原理。分析结果表明, 提出的技术能够有效地解决配电网电压频繁波动的问题, 提高配电变压器的寿命、降低配电变压器的损耗, 同时提高配电变压器的智能化程度和可靠性。

关键词: 智能配电变压器; 串联调压; 混合开关调压; 漏磁通; 绕组绝缘故障检测

Voltage regulation and insulation fault detection technology of intelligent distribution transformer

JIN Guiyang^{1,2}, YANG Keji², DAI Yongjun³, MA Shangxing³

(1. Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China; 2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang JEC New Energy Technology Co., Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: In order to solve the problem of voltage fluctuation and bidirectional power flow due to distributed power generation systems connected to distribution network, a new voltage regulation technology based on series transformer is proposed. By using vacuum contactor and thyristor to control the series transformer tap and star-triangle transformation, the voltage can be regulated quickly and effectively. The voltage regulation principle based on series transformer and the voltage regulation technology based on vacuum contactor and thyristor are analyzed. A winding insulation fault detection technology based on leakage flux is also presented, and its principle, the concrete realization method and experiment verification principle are described too. The analysis shows that the proposed technology can effectively solve the distribution network voltage fluctuation, improve the lifetime of distribution transformer, reduce the loss of distribution transformer, and at the same time, improve the intelligence and reliability of distribution transformer.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2014AA052005).

Key words: intelligent distribution transformer; voltage regulation based on series transformer; hybrid switch voltage regulation; leakage flux; winding insulation fault detection

0 引言

分布式发电系统, 如小水电、风电、太阳能等, 由于受到季节和气候影响, 随机性大, 接入配电网后会对配电系统的结构和运行产生很大的影响, 配电网系统从传统的辐射型转变为多电源结构, 潮流的大小和方向也因此发生变化, 导致系统电压也随之

频繁波动^[1-5]。在这种情况下, 如何保证配电网的电能质量, 是一个重要的研究课题。电压是衡量电能质量的重要指标之一, GB12325-2008《电能质量供电电压允许偏差》^[6]对不同电压等级电压偏差的限制作了明确规定: ① 35 kV 及以上供电电压正、负偏差绝对值之和不超过额定电压的 10%; ② 20 kV 及以下三相供电电压偏差在-7%~7%; ③ 220 V 单相供电, 电压偏差在-10%~7%。传统的配电网在大量分布式能源和电动汽车的影响下, 将很难保证电

压的质量,尤其是传统的配电变压器不易于双向和频繁地调节输出电压,已经不能适应这些新的发展趋势。另一方面,配电网设备的可靠性是配电网安全可靠运行的基础,而可靠性的前提是能够尽早地发现设备存在的隐患,并在破坏性故障发生之前消除它们,因此我们需要对配电变压器最易发生的绕组绝缘故障进行在线监测。

大型电力变压器一般采用机械式调压装置,这种调压装置体积大、成本高、运行维护工作量大、切换时伴有电弧,会显著降低触头寿命和加速变压器油劣化。有学者研究了晶闸管辅助机械开关^[7],并且设计了熄弧电路,获得了较好的熄弧效果,但由于调压装置还存在移动部件,导致调节速度慢、故障率高、不易频繁切换,因此这两种形式的调压装置都不太适用于低成本和需要频繁切换的配电变压器。为了在配电变压器上取消机械式调压系统,很多研究单位采用了晶闸管开关来代替抽头开关,但是一般系统的调压开关都在高压绕组上,所需的晶闸管耐压值和容量比较大^[8-9]。KORNER^[10]采用真空接触器和晶闸管来实现有载无弧调压,其中晶闸管只用于切换过程中的过渡电路中,这样可以提高配电变压器的可靠性,在实际应用中取得了很好的效果。同样地,大型电力变压器采用了很多在线健康监测方法,如油中溶解气^[11]、局部放电、声发射、光纤测温、扫频阻抗法^[12]以及各种人工智能诊断技术^[13-15],但是当把这些技术应用于配电变压器的在线检测时,都存在检测设备复杂、安装复杂和成本高等问题。

本文提出在传统变压器的基础上串联一个晶闸管和真空接触器控制的调压变压器,利用串联变压器来调节配电变压器的输出电压。这种调压方式无移动部件,且主变压器无调压分接头、因此无电弧、故障率低、可靠性高。增加的串联变压器只要承受很小的调整电压,所以所需的晶闸管容量小。采用晶闸管和真空接触器协调控制使得调压快速、可频繁调整,比较适合越来越复杂的配电网系统。此外,本文提出了基于漏磁通的绕组绝缘故障在线检测技术,基于这种技术开发的在线检测装置成本低廉、安装方便,能够检测早期的绕组绝缘故障。

1 基于串变的配电变压器调压系统设计

1.1 串变调压原理

图1给出了基于串联变压器调压的原理图。主变压器(主变)变比 K_1 固定,通过调压控制器可以改变串联变压器(串变)的二次绕组的抽头以及它的联结方式,从而改变串变一次侧附加电势 E'_{AX} 。当电

网电压 U_A 不变时,由 $U_A = E_A + E'_{AX}$ 得, E'_{AX} 的改变必然导致主变一次侧电势 E_A 的改变,进而改变主变二次侧空载电势 E_a 的值。 E_a 的改变又影响 E'_a ,也影响 E'_{AX} 。为了能够精确地控制变压器的输出电压,我们需对它们之间的关系进行推导。

设主变为Yy0接法,其变比固定为 $K_1 = E_A / E_a$,串变的可变变比为 $K_2 = E'_A / E'_a$,其中 E_A, E_a, E'_A, E'_a 为各绕组的空载电势,调压控制器可以控制串变的变比 K_2 。 E'_A 为串变一次绕组为D型接法时的空载电势,当其变为Y型接法时, E'_A 的等值电势为 E'_{AX} ,引入接线系数 $K_{C1} = E'_{AX} / E'_A$,反映了串变一次绕组D-Y变换时,线电势与相电势的关系。调压控制器可使串变的二次绕组联结为D或Y型,即通过调压控制器,可使串变的联结形式为Yy0、Dd0, Dy11, Dy7等多种形式,故可以定义 $K_{C2} = E'_a / E_a$ 为调压控制器的接线系数,它反映了控制器在不同状态下,串变二次绕组和主变二次绕组的感应电势之间的比值。根据图1,以及上面接线系数的定义,可得该变压器各空载电势的关系式为

$$U_A = E_A + E'_{AX} = K_1 E_a + K_{C1} E'_A = K_1 E_a + K_{C1} K_{C2} K_2 E'_a \quad (1)$$

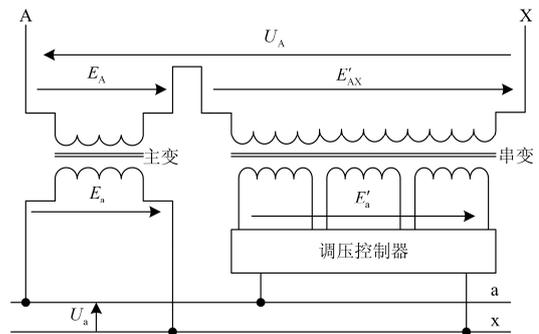


图1 串变调压原理图

Fig. 1 Principle of voltage regulation based on series transformer

可以推出:

$$E'_a = \frac{U_A}{K_1 + K_{C1} K_{C2} K_2} = \frac{U_A}{K_1 + K_C K_2} \quad (2)$$

式中, $K_C = K_{C1} K_{C2}$ 称为整个变压器的接线系数,反映了串变一、二次绕组与主变一、二次绕组的联结关系。

U_a 是需要控制的输出电压,而 $U_a = E_a$,从式(2)中可以看出,当主变变比 K_1 不变时,通过改变 K_C 和 K_2 ,可以多档次调节主变低压绕组的空载电势,实现变压器的调压。

1.2 调压系统的参数设计

配电变压器根据其所处的环境不同,需要设计

成不同的调压等级, 如需要精细调节的, 可以设计成 $(1\pm 4\times 2.5\%)$ 调压等级, 也可以设计成 $(1\pm 2\times 2.5\%)$ 、 $(1\pm 5\%)$ 等。因此, 我们需要合理地选择 K_2 和 K_C 来实现不同的调压等级。

变压器的变比可以定义为高低压绕组的空载电势之比, 公式为

$$K = \frac{U_A}{U_a} = \frac{U_A}{E_a} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 得

$$K = K_1 \left| 1 + \frac{K_C K_2}{K_1} \right| \quad (4)$$

普通变压器的可变变比也可以表示为

$$K = \frac{U_{IN}}{U_{IIN}} (1 \pm n \times \Delta U\%) \quad (5)$$

式(5)中: U_{IN} , U_{IIN} 分别表示普通变压器一次绕组和二次绕组主抽头的电压; $\Delta U\%$ 为调压级差百分数; n 为上下调节档次 ($n=0, 1, 2, 3, \dots$)。这里将本文设计的基于串变调压的配电变压器的主变压器变比 K_1 固定选择为 $\frac{U_{IN}}{U_{IIN}}$ 。

由式(4)、式(5)可得

$$K = K_1 \left| 1 + \frac{K_C K_2}{K_1} \right| = \frac{U_{IN}}{U_{IIN}} (1 \pm n \times \Delta U\%) \quad (6)$$

进一步可推出:

$$(1 \pm n \times \Delta U\%) = \left| 1 + \frac{K_C K_2}{K_1} \right| \quad (7)$$

从式(7)可以得出 K_2 、 K_C 与变压器调压变比等级之间的关系。

一旦主变和串变绕组的接线型式和联结组别确定了, 则 K_{C1} , K_{C2} , K_C 都可以确定, 因此可以根据调压等级的需求来确定 K_2 的值。

根据上面的公式, 我们来计算和选取10/0.4 kV配电变压器且调压等级为 $(1\pm 2\times 2.5\%)$ 时的各个参数的值, 其中主变采用Yy0接法, 串变一次侧采用D型接法, 此时 $K_{C1} = E'_{AX} / E'_A = e^{-j30^\circ} / \sqrt{3}$, 其余参数的计算结果如表1所示。

由表1可以看出: 通过真空接触器和晶闸管组成的调压控制器对串变的联接组别和变比进行调整, 可以快速精确地实现变压器的调压控制, 且调节误差在0.5%以内。

1.3 基于真空接触器和晶闸管的调压控制器设计

为了克服纯机械式开关切换时产生电弧不利于频繁调节以及电力电子开关在长期负载时能耗大的问题, 本文采用机械和电力电子复合式的开关来

表1 调压系统有关参数设计

调压等级	1-2×2.5%	1-2.5%	1	1+2.5%	1+2×2.5%
串变组别	Dd10	Dy11	Yy	Dy7	Dd8
K_{C2}	$\sqrt{3}e^{-j30^\circ}$	1	0	e^{-j120°	$\sqrt{3}e^{-j90^\circ}$
K_C	e^{-j60°	$e^{-j30^\circ}/\sqrt{3}$	0	$e^{-j50^\circ}/\sqrt{3}$	e^{-j120°
K_2	2.5	1.25	-	1.25	2.5
输出相电压	219.9	225.3	230	236.9	243.1
误差(%)	0.3396	0.0099	0	0.011	0.1095

调整串变的接线方式和变比。

通过上一小节的分析, 主要通过串变二次绕组的星-角变换(D-Y)和变比变化来调整变压器输出电压。如图2所示, 通过6套真空接触器和反并联晶闸管的组合开关实现串变二次绕组的D-Y变换。其中 S_{a1} 、 S_{b1} 和 S_{c1} 导通时为星型接法(Y), S_{a2} 、 S_{b2} 和 S_{c2} 导通时为三角形接法(D)。切换过程如下, 假设由三角形接法切换为星型接法, 首先接入过渡电阻 R_a 、 R_b 和 R_c , 其次导通 S_{a1} 、 S_{b1} 和 S_{c1} 组合开关中的晶闸管, 然后切断 S_{a2} 、 S_{b2} 和 S_{c2} 组合开关中的真空接触器, 再接通 S_{a1} 、 S_{b1} 和 S_{c1} 中的真空接触器, 最后切断 S_{a1} 、 S_{b1} 和 S_{c1} 中的晶闸管和3个过渡电阻。

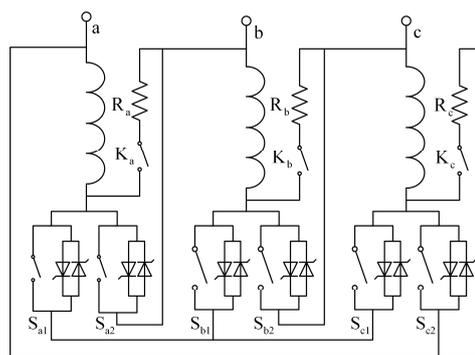


图2 D-Y变换控制图

Fig. 2 Control chart of star-triangle transformation

与前面D-Y变换控制类似, 变比的变化也基于真空接触器和反并联晶闸管的组合开关实现。如图3所示, 变比的变化主要由反并联晶闸管T、过渡电阻R、真空接触器K等元件实现。变比变换过程如下, 假设需要将变比从1变到2, 首先导通反并联晶闸管, 其次将真空接触器从档位1切换到档位2, 切换完成后, 关断晶闸管, 由真空接触器承载稳定后的负载。晶闸管电路只在过渡过程使用, 克服了切换过程中的电弧、抑制了涌流, 正常工作时的负载则由真空接触器承担, 降低了正常工作时的能耗和发热量, 从而延长了真空接触器和晶闸管的使

使用寿命。

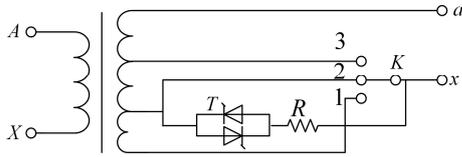


图 3 串变变比控制图

Fig. 3 Control chart of series transformer tap

2 配电变压器绕组绝缘故障在线监测方法

配电变压器在供配电网中发挥着重要的作用，它的安全运行对整个电网的正常运行起着决定性的作用。绝缘故障是变压器最常见的故障形式。在发生短路故障时，工作电流急速增大，远远超过正常状况下的额定电流。而绕组线圈短路受力正比于电流的平方，因此线圈短路受力会达到额定工作状态下受力的几百倍。在突发短路时产生的电动力使绕组同时受到压拉、弯曲等各种力的作用，容易引起绕组变形和匝间短路等绝缘故障，但是这些故障比较隐蔽，不容易检查。变压器遭受短路冲击后，在气体继电器内部会积聚大量气体，因此在变压器事故后可收取继电器内的气体和对变压器内部的油进行化验分析，可判断事故性质，但是油中溶解气检测设备昂贵^[16]，对早期绝缘故障不敏感。因此，本文提出一种基于漏磁通的绕组绝缘故障在线监测方法，这种方法不仅成本低廉、实施方便，而且便于检测早期的绕组绝缘故障。

2.1 检测原理

变压器绕组线圈内通有电流时，就会在线圈周围的空间形成磁场，由于铁芯的导磁性能比空气好得多，所以绝大部分磁通将在铁芯内通过，这部份磁通称为主磁通。除了主磁通，围绕载流线圈和部分铁芯周围的空间，还存在少量分散的磁通，它们不按铁芯所规定的磁路流动，这部份磁通称为漏磁通。对于安匝平衡、绕组上下对称和正常运行状态的变压器，它的漏磁通具有如下特征^[17]：1) 径向漏磁分量沿绕组高度的分布不均匀，在绕组两端数值最大，在绕组高度的中心处减小为零；2) 轴向漏磁分量的分布情况与径向漏磁分量相反，最大值出现在绕组中部，绕组高度的中心处往绕组两端方向呈逐渐减小趋势；3) 通常情况下，双绕组变压器的漏磁通分布均有以绕组为中心大体对称分布的特点。图 4 通过有限元方法对理想变压器进行了漏磁通的仿真，左边的图是变压器健康状况下沿轴向与绕组

表面平行的某一直线上的一个周期内的 3 个时间点的漏磁密度分布，右边的图为绕组匝间短路时同一条直线上的一个周期内的 3 个时间点的漏磁密度分布。图中 H 为变压器绕组的高度，因此 $H/2$ 刚好是绕组的对称中心高度。从左图可以看出健康的变压器在不同时刻的漏磁通都以绕组 $H/2$ 高度处上下对称分布。从右图可以看出，当变压器发生匝间短路时，漏磁通的分布失去了上下对称性。我们可以利用这个性质，来对变压器的绕组匝间短路或绕组变形等绝缘故障进行早期在线监测。

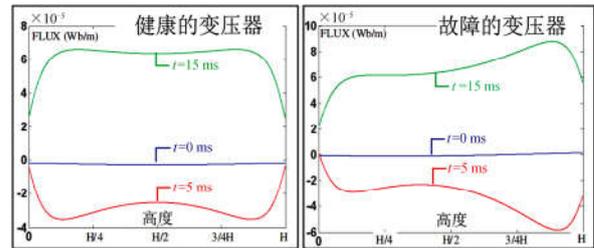


图 4 一周期内 3 个不同时刻的绕组某一轴向平行线上的漏磁密度分布

Fig. 4 Leakage flux density along a line parallel to the winding in three different time instances of a cycle

2.2 绕组绝缘故障在线监测的实现

如图 5 所示，如果在变压器绕组表面附着简易线圈，在变压器通电时，根据电磁感应原理，变压器的漏磁通将在简易线圈上感应出电势。图中的虚线表示变压器绕组的中心对称面，根据上节的分析，理想变压器的漏磁通在中心面的上下对称分布，因此如果在中心面上上下轴向布置两个对称的简易线圈，它们感应出的电势将大小相等、方向相反。图中右边是变压器绕组和两个简易线圈的等效电路图。由于对称性，图中两个简易线圈感应电势的串联输出 V_{out} 将为零。如果变压器发生故障，如变压器绕组的下半部分发生匝间短路，则变压器绕组中心面上下的漏磁通失去了对称性，这时两个简易线圈的感应电势也将发生改变，它们不再大小相等，此时它们的串联输出 V_{out} 将不再是零。当然实际的变压器，由于制造工艺的问题，不可能完全做到上下对称，而且简易线圈的轴向布置也不可能完全做到上下对称，这时即使变压器是无故障的， V_{out} 输出也不一定是零。但是根据仿真结果，可以判断实际变压器绕组故障时的 V_{out} 输出比变压器健康时的输出大不少，所以我们还是可以根据 V_{out} 的输出，方便地判断变压器的绕组是否存在绝缘故障。

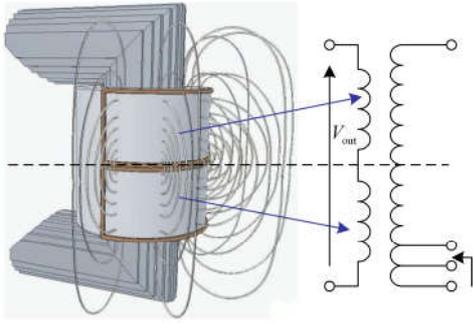


图 5 绕组绝缘故障漏磁检测示意图

Fig. 5 Schematic of winding insulation fault detection based on leakage flux

2.3 基于漏磁的绕组故障检测实验原理分析

实验装置原理如图 6 所示, 图中所示绕组为本文设计配电变压器的主变的原副边绕组。为了模拟绕组的短路故障, 我们在变压器的每个绕组上引出 4 个接线端子, 分别为首尾各两个。通过连接不同的接线端子, 可以模拟不同绕组、不同部位、不同程度的短路故障。同时为了避免对绕组产生永久破坏, 我们可以在短接电路上接入限流电阻 R , 使得短路电流小于绕组的额定电流。在实际情况下, 绕组的短路会产生比较大的短路电流, 它对绕组产生的破坏大于实验情况下绕组的损坏程度。因此通过这种方式, 我们可以有效地模拟绕组短路故障, 对基于漏磁的绕组故障检测做很好的实验验证。

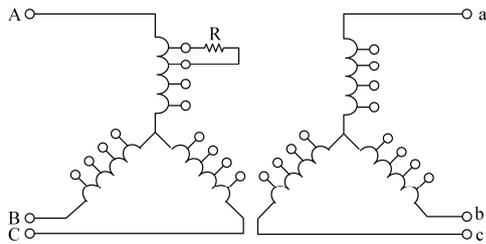


图 6 实验装置原理图

Fig. 6 Schematic diagram of experiment device

3 结论

针对现有配电变压器调压装置和绝缘故障检测方法存在的问题, 本文提出了配电变压器的串变调压和基于漏磁通的绕组绝缘故障检测技术。结论如下。

1) 基于真空接触器和晶闸管的调压控制方式, 取消了调压装置的机械移动部件, 晶闸管只用于调压时的过渡过程, 正常运行时用真空接触器负载, 提高了调压装置的可靠性和敏捷性, 降低了故障率。

2) 基于串联变压器的调压方式, 降低了调压装置承受的电压和电流, 因此降低了所需真空接触器

和晶闸管的容量, 进一步提高了系统的可靠性, 也降低了所需器件的成本。

3) 基于漏磁通的绕组绝缘监测技术, 为配电变压器提供了一种简单易行、低成本的绝缘故障监测方法。

本文后续还有许多工作要完成, 需要制造实验用的变压器, 选取合适的真空接触器和晶闸管, 设计和制造相应的调压控制器; 对不同载荷和不同调压等级下的 V_{out} 输出进行测试验证, V_{out} 输出的后处理电路的设计, 同时还需增加远程通信能力, 实现配电变压器状态信息、故障信息和控制信息的远程传输。

参考文献

- [1] 吕忠, 周强, 蔡雨昌. 含分布式电源的 DEIWO 算法配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 69-73. LÜ Zhong, ZHOU Qiang, CAI Yuchang. Reactive power optimization in distribution network with distributed generation on DEIWO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 69-73.
- [2] 王贵斌, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 22-29. WANG Guibin, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 22-29.
- [3] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124. ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [4] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53. WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of volt/var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [5] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97. CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection

- and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12325-2008 电能质量供电电压偏差[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12325-2008 power quality deviation of supply voltage[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [7] 梁贵书, 晏阔, 高飞, 等. 变压器混合式有载分接开关熄弧方法的仿真及试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3156-3163.
LIANG Guishu, YAN Kuo, GAO Fei, et al. Study on simulation and experiments of method of extinction hybrid on-load tap changer in transformers[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3156-3163.
- [8] 张品秀. 基于晶闸管的有载自动调压分接开关的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2009.
ZHANG Pinxiu. Study on on-load automatic tap-changer based on thyristor[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2009.
- [9] 赵玉林, 宋伟. 配电变压器无触点有载调压中反并联晶闸管光纤触发方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 97-101.
ZHAO Yulin, SONG Wei. Optical trigger scheme of inverse-parallel thyristor in contactless on-load tap-changing voltage for distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 97-101.
- [10] KORNER C, HENNIG M, SCHMID R, et al. Gaining experience with a regulated distribution transformer in a smart grid environment[C] // Integration of renewable into the Distribution Grid, CIRED 2012 Workshop. IET, 2012: 1-4.
- [11] 贾立敬, 张建文, 王传林, 等. 基于 DGA 的差分进化支持向量机电力变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 13-18.
JIA Lijing, ZHANG Jianwen, WANG Chuanlin, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DGA of algorithm for SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 13-18.
- [12] 李留文, 刘丹丹, 谭贵生. 基于粗糙集与支持向量机的变压器故障诊断[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 78-82.
LI Liuwen, LIU Dandan, TAN Guisheng. Transformer fault diagnosis method based on rough set and support vector machine[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 78-82.
- [13] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505-4516.
LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505-4516.
- [14] 苑津莎, 张利伟, 李中, 等. 基于互补免疫算法的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 67-75.
YUAN Jinsha, ZHANG Liwei, LI Zhong, et al. Fault diagnosis of transformers based on complementary immune algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 67-75.
- [15] 李赢, 舒乃秋. 基于模糊聚类和完全二叉树支持向量机的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 64-70.
LI Ying, SHU Naiqiu. Transformer fault diagnosis based on fuzzy clustering and complete binary tree support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 64-70.
- [16] 毛知新, 文劲宇. 变压器油中溶解气体光声光谱检测技术研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 135-143.
MAO Zhixin, WEN Jinyu. Research on the detection of the dissolved gas in the transformer oil by photoacoustic spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 135-143.
- [17] 黎大健, 王佳琳, 陈梁远, 等. 基于有限元法的变压器漏磁场及电动力分析[J]. 广西电力, 2014, 37(6): 15-17.
LI Dajian, WANG Jialin, CHEN Liangyuan, et al. Analysis of transformer leakage magnetic field and electrodynamic force based on finite element method[J]. Guangxi Electric Power, 2014, 37(6): 15-17.

收稿日期: 2016-07-15; 修回日期: 2017-01-10

作者简介:

金贵阳(1981-), 男, 通信作者, 博士后, 研究方向为智能配电变压器; E-mail: jinguiyang@gmail.com

杨克己(1963-), 男, 博士研究生, 教授, 长期从事无损检测等研究. E-mail: yangkj@zju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)