具有保护功能的配电变压器无触点有载自动调压分接开关

赵玉林,牛泽晗,李海凤,汪　清
(东北农业大学 电气与信息学院,黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要：为防止有载自动调压分接开关(OLTC)的电力电子组件击穿而引起调压绕组短路进而导致 OLTC 损坏,设计了一种应用低压空气开关对调压绕组进行过流保护的无触点 OLTC。通过低压空气开关、监控系统、触发电路的配合,实现当任一组电力电子组件被击穿时,有载调压功能退出,变压器自动恢复到额定分接头继续运行,从而保证了供电可靠性。实验结果表明,所设计的无触点 OLTC 在配电变压器一次侧出现环流时,能对调压绕组起到保护作用,使变压器可以在额定分接头下继续工作;在配电变压器正常运行时,所设计的无触点 OLTC 能根据负载电压变化自动调节变压器输出电压。

关键词：配电变压器；无触点；分接开关；保护功能；触发电路；空气开关
中图分类号：TM 761　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.025

0　引言

无触点有载自动调压分接开关(以下简称分接开关)具有可频繁动作、动作时无电弧产生、反应迅速等优点,因此被应用于配电变压器实现有载调压[1-6],稳定 0.4 kV 配电系统电压。因此,如何实现无触点有载自动调压成为配电系统近年来研究的热点课题[7-12]。但电力系统要求供电可靠,而无触点有载调压中执行开关功能的电力电子组件及控制系统中的电子器件均可能发生故障,导致配电变压器调压绕组短路而损坏,这也是制约分接开关在电力系统中应用的关键因素之一。如何在调压绕组产生环流时对配电变压器实现保护,进而实现不中断供电的研究却未见报道。

本文以现有的有载调压配电变压器主体为对象,设计出一套分接开关系统。该系统在分接开关出现故障时,可将有载自动调压功能退出,使配电变压器自动恢复到额定分接头继续供电,具有保护调压绕组和保证供电可靠性的双重功能。

1　分接开关主电路

1.1　分接开关的构成

分接开关与配电变压器本体连接接线如图 1 所示,图中 SCR、TRIAC 分别表示普通晶闸管和双向晶闸管。

分接开关由开关执行单元、监控单元、过流保护单元、触发单元和启动单元五部分组成,分Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个档位,分别对应配电变压器高压侧 105%U_N、U_N 和 95%U_N 3 个分接头。开关执行单元以反并联晶闸管模块作为有载调压执行分接开关,以阻容吸收模块作为过电压限制组件;监控单元以单片机为控制器,通过电压检测电路,采集高压侧分接头之间的电压从而确定负荷电压,并由高压侧调压绕组提供电源;过流保护单元以自动空气开关(AS)作为过流检测和保护组件;触发单元中,Ⅰ、Ⅲ 档位分接开关采用 TLP3041 光耦构成的触发器,Ⅱ档位分接开关则采用 TLP521-4 光耦构成的触发电路[13-15];启动单元不设专用电路,借用Ⅱ档位分接开关,通过 TLP521-4 光耦构成的触发电路,实现无源自启动功能。

图 1 中,为监控系统供能采样的变压器 T 一次侧跨接在配电变压器高压侧Ⅰ档位和Ⅲ档位之间,Ⅰ、Ⅲ档位的 6 组反并联晶闸管采用有源触发方式,即监控单元有电且输出低电平控制信号后,通过由 TLP3041 构成的触发电路使相应晶闸管导通,在监控单元无电或有电但发出高电平控制信号时,相应的晶闸管将处于关断状态;Ⅱ档位的 3 组反并联晶闸管则采用相反的触发方式,即在监控单元无电或有电但控制信号为高电平时导通,反之处于截止状态。

1.2　自动稳定输出电压原理

在变压器负荷不变时,随着电网电压的变化,分接头之间的电压将发生改变。而在电网电压不变时,由于高压绕组漏电感抗的存在,负荷电流的变化也必然导致漏感抗压降的变化,进而导致分接头之间的电压发生改变,因此,分接头之间电压的变化实时地反映了负荷的变化。综上所述,监控系统根据

收稿日期:2015-09-12;修回日期:2016-07-28
基金项目:2012 黑龙江省高校科技成果产业化前期研发培育项目(1252CGZH30);2013 哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2013DB2BG015)
Project supported by the Preliminary Research and Cultivation Project of Industrialization of Science and Technology Production for Universities in Heilongjiang Province (1252-CGZH30) and Research and Development Project of Applied Technology in Harbin(2013DB2BG015)

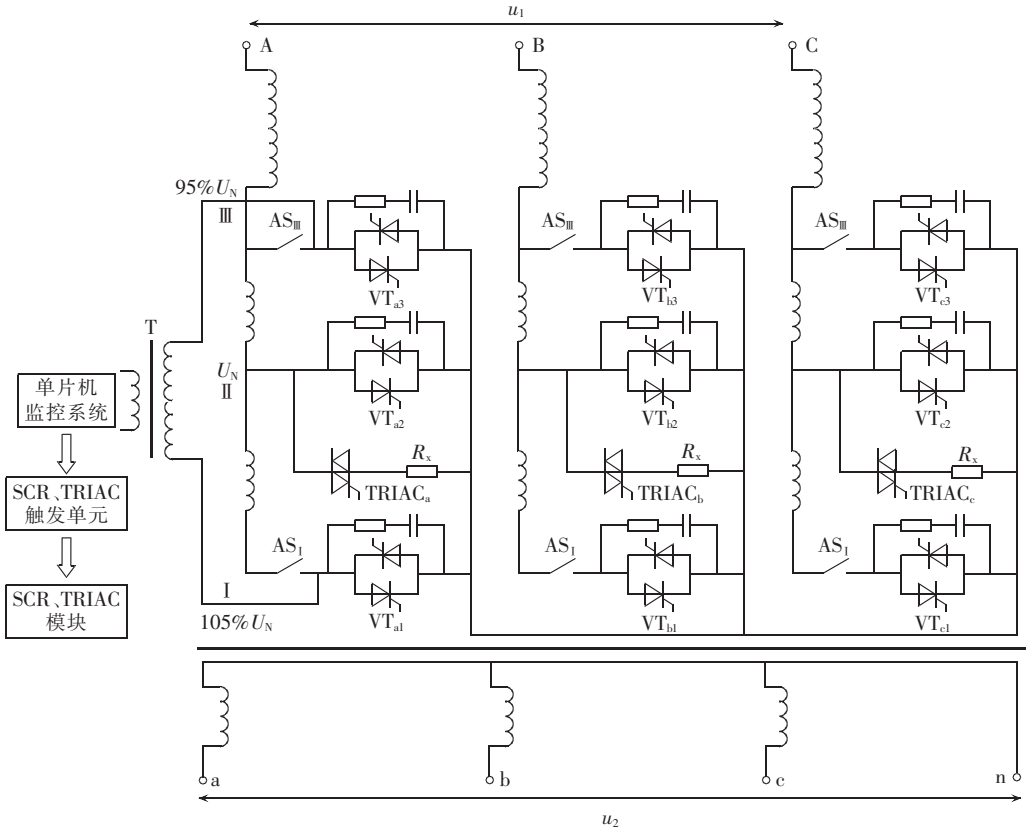

图 1 无触点 OLTC 及与配电变压器的连接图

Fig.1 Schematic diagram of connections between contactless OLTC and distribution transformer

分接头电压的变化而自动地改变分接头,就可达到基本稳定变压器输出电压的目的。

1.3 保护功能实现原理

在图 1 中,对于接在Ⅰ、Ⅲ档位的开关元件,当其中一档处于导通状态,另一档处于截止状态时,其承受的电压最高,为调压绕组之间的最高电压。而在任何情况下,接在Ⅱ档位上的开关元件承受的最高电压仅为接在Ⅰ、Ⅲ档位开关元件承受的最高电压的一半,且开关元件所选用的参数相同,则接在Ⅱ档位的开关元件的安全裕度是接在其他 2 个档位的开关元件的安全裕度的 2 倍,又因为Ⅰ、Ⅲ档位的开关元件电压安全裕度为 3 倍额定电压,电流安全裕度倍数为 31,所以接在Ⅱ档位的开关元件不会出现过流击穿,发生电压击穿的概率也很低,因此,Ⅱ档位的分接开关在无保护装置的情况下,可以确保自身不被击穿。因此从经济、技术及供电可靠性考虑,仅对Ⅰ、Ⅲ档位的开关元件进行过流保护。

Ⅰ、Ⅲ档位的开关元件无论是在分接头变换过程中,还是在正常运行时,当任一档位的晶闸管模块因被击穿而引起调压绕组短路产生环流时,在其相应回路中的自动空气开关都将瞬时跳开,切断短路电流。自动空气开关跳开后,监控单元供电变压器 T 也将失去电源,致使监控单元因失电而退出调压功能,同时Ⅱ档位的 3 组反并联晶闸管会因监控单元失去电源而自行导通,配电变压器高压侧保持在额定档位继续运行,既实现对调压绕组的保护,又保证配电变压器继续供电运行。

2 触发电路

2.1 Ⅰ、Ⅲ档位分接开关触发电路

2.1.1 电路构成

根据总体功能要求,高压侧Ⅰ、Ⅲ档位的反并联晶闸管应在监控单元无电或监控单元有电但输出高电平时截止,在监控单元有电且输出低电平时导通。为实现本功能,本文采用 TLP3041 光耦作为监控单元与触发电路的耦合组件,晶闸管采用自取能方式获取触发电压,电路如图 2 所示。

图 2 中,作为分接开关的反并联晶闸管模块跨接在调压绕组与中性点之间,对于 10 kV、5% 分接头的配电变压器,按电压波动±10%计算,则正常工作时,Ⅰ、Ⅲ档位的反并联晶闸管所承受的最高工作电压有效值为:

$$\frac{11000}{\sqrt{3}}\times 10\%=635.09\ (\mathrm{V}) \qquad (1)$$

由于开关元件采用 90 A/2000 V 的反并联晶闸管,而 TLP3041 光耦输出侧双向晶闸管耐压值为

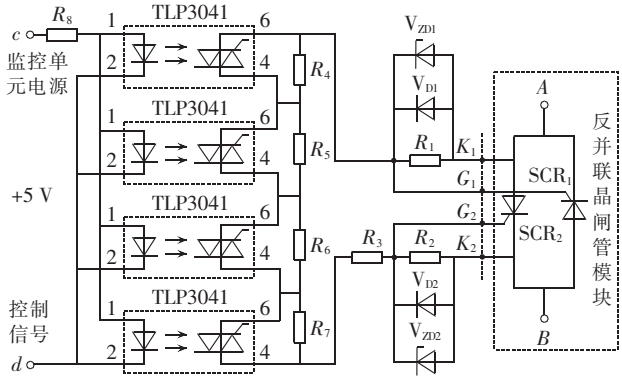

图 2 Ⅰ、Ⅲ档位反并联晶闸管模块触发电路

Fig.2 Triggering circuit for inverse parallel thyristor module of Tap Ⅰ or Ⅲ

400 V,考虑电路的安全裕度,采用 4 个 TLP3041 串联的方式来提高电路耐压能力。

2.1.2　电路工作原理

触发分接开关工作过程:系统正常上电工作后,当监控单元输出端 d 输出低电平控制信号,且在 TLP3041 检测到 A、B 间电压在过零点附近($|\boldsymbol{U}_{AB}|>0$)时,TLP3041 输出侧光控双向晶闸管导通,电阻 R_4、R_5、R_6 和 R_7 被短路,$|\boldsymbol{U}_{AB}|$ 在 R_1 或 R_2 上产生触发电压,使反并联晶闸管模块导通。例如当 A、B 两端电压从零开始升高到设定值 U_{AB}=20 V 时,二极管 V_{D1} 导通、V_{D2} 截止,电阻 R_1 被短路,R_2 上的压降 U_{R2} 高于 SCR_2 的触发电压 U_{GT},SCR_2 触发导通。同样地,当 U_{BA}=20 V 时晶闸管 SCR_1 导通。

关断分接开关工作过程:在监控单元失去电源或监控单元有电且输出端 d 为高电平控制信号时,TLP3041 输入侧红外发光二极管因没有电流流过而不发光,从而使光耦处于截止状态,A、B 两端电流流经电阻 R_4、R_5、R_6 和 R_7,电阻 $R_i(i=4,5,6,7)$的选择保证了反并联晶闸管模块在其所能承受的任一电压作用下,其触发电阻 R_1 和 R_2 上的压降均低于晶闸管的触发电压,确保了晶闸管在电流过零关断后因没有触发电压而处于关断状态。

2.1.3　组件参数设计与验证

电路组件参数的选择要考虑到在变压器变换分接头过程中可能有过电压和短时过电流的产生,因此,主电路电力电子组件应该留有较大的裕量,本触发电路基于触发 MTC 92-20 反并联晶闸管模块而设计。触发电路中半导体器件参数选择如表 1 所示。

触发电阻 R_1、R_2 和限流电阻 R_3 的取值取决于反并联晶闸管模块参数,由 MTC 92-20 说明书可知:晶闸管应采用 6 V 强触发,触发电路提供电流应能达到 4~5 倍的 I_{GT},且触发电流应在 100 μs 内上升至 1.5 I_{GT} 以上。设定反并联晶闸管模块触发导通前两端电压为 20 V,则电阻 R_1、R_2 和 R_3 的取值应满足:

表 1 基于 TLP3041 触发电路半导体组件型号及其参数

Table 1 Type and parameters of semiconductor components of TLP3041-based triggering circuit

器件名称	型号	参数符号	参数值
反并联晶闸管模块	MTC 92-20	门极触发电流 I_{GT}	100 mA
		门极触发电压 U_{GT}	2.5 V
		最大不导通门极电压 U_{GD}	0.25 V
		最大通态电流 I_{TAV}	90 A
稳压管 V_{ZD1}、V_{ZD2}	1N4738	稳定电压 U_Z	8 V
二极管 V_{D1}—V_{D4}	1N4007	正向电压降 U_F	1.1 V
光电耦合器	TLP3041	光耦输入侧 LED 触发电流 I_{FT}	15 mA
		光耦输入侧 LED 正向电压 U_{FT}	1 V
		光耦输出侧重复浪涌峰值电流 I_{TSM}	1.2 A

$$\frac{U_{AB}-U_F-4U_{FT}}{R_{2(1)}+R_3}R_{2(1)}\geqslant U_{GT} \tag{2}$$

$$\frac{U_{AB}-U_F-4U_{FT}-U_{GT}}{R_3}\geqslant 4I_{GT} \tag{3}$$

当监控系统无电或监控单元有电但输出高电平时,晶闸管处于截止状态,4 个串联电阻 R_4、R_5、R_6 和 R_7 应符合以下关系式:

$$\frac{U_{AB}-U_F-U_{R4-7}}{R_{2(1)}+R_3}R_{2(1)}\leqslant U_{GD} \tag{4}$$

$$\frac{U_{AB}-U_F-U_{R4-7}-U_{GT}}{R_3}R_{2(1)}<I_{GD} \tag{5}$$

其中,U_{R4-7} 为电阻 R_4、R_5、R_6、R_7 端电压的和。

TLP3041 输入侧限流电阻 R_8 的取值应满足:

$$U_{cd}-4R_8I_{FT}\geqslant U_{FT} \tag{6}$$

据上述分析,选择各电阻参数如表 2 所示。

表 2 基于 TLP3041 触发电路电阻组件参数

Table 2 Parameters of resistor components of TLP3041-based triggering circuit

电阻	阻值/Ω	功率/W
R_1	20	0.25
R_2	20	0.25
R_3	82	2
R_4、R_5、R_6、R_7	2×10^6	0.5
R_8	51	1

针对所设计的触发电路的可行性进行了测试,测试电路如图 3 所示。以 5 V 直流电源模拟控制信号和电源,250 V 交流可调电源经由白炽灯构成的 300 W 灯盘负载加到反并联晶闸管模块上,通过控制直流电源的通断检验触发电路的导通与关断功能;通过调节交流电压值,采用示波器(SC)来观察和测量反并联晶闸管波形及电压值,最后观察灯盘亮灭判断反并联晶闸管的通断状态。

测试结果为:当图 3 中的 c、d 端接通 +5 V 电压且 A、B 两端电压高于 20 V 时,灯泡点亮,表明晶闸管导通,关断直流电源时,灯泡熄灭,说明晶闸管处

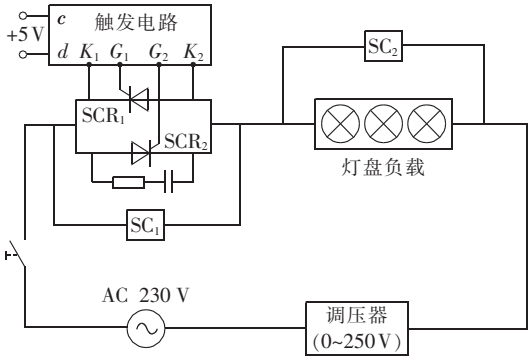

图3 Ⅰ、Ⅲ档位OLTC触发电路测试原理图

Fig.3 Test circuit for OLTC trigger of Tap Ⅰ or Ⅲ

于截止状态。直流电源的通断可以使灯泡点亮或熄灭,表明在监控系统无电或没有低电平控制信号输入时反并联晶闸管关断,反之导通,实现对触发电路的功能要求。

Ⅰ、Ⅲ档位的分接开关两端的电压波形及负载波形分别如图4、图5所示。

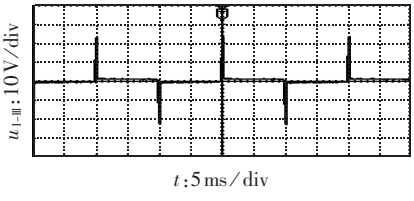

图4 Ⅰ、Ⅲ档位OLTC两端电压波形图

Fig.4 Voltage waveform of OLTC for Tap Ⅰ or Ⅲ

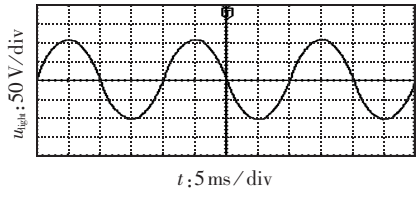

图5 Ⅰ、Ⅲ档位OLTC作用下灯盘负载两端电压波形图

Fig.5 Voltage waveform of lamp load, with OLTC for Tap Ⅰ or Ⅲ

从图4、图5中可以看出,反并联晶闸管触发导通稳定,负载波形畸变程度小。

2.2 Ⅱ档位分接开关触发电路

高压侧Ⅱ档位的分接开关要兼做启动开关,而启动过程中监控系统是不工作的,所以要求该触发电路具有在监控系统无电或监控系统有电且输出高电平控制信号时,反并联晶闸管能利用自身触发电路通过自取能方式获得触发电压从而导通,而当监控系统有电且输出低电平控制信号时关断。为此采用TLP521-4光耦作为触发电路和监控单元的耦合组件。触发电路[16]与图2类似,将耦合组件换为TLP521-4即可,在此不再赘述。

如果TLP521-4光耦输入侧没有电压作用,即相当于监控系统没有电压(启动状态/空开跳闸后状态),或有电压但控制信号为高电平,则光耦输出侧处于截止状态,在待触发的反并联晶闸管模块两端电压作用下,小晶闸管V_{Ti}(i=1,2,3,4)导通,并在R_1或R_2上产生高于反并联晶闸管模块触发电压的电压,使其触发导通。当TLP521-4光耦输入侧有电压,且控制系统输出端发出低电平控制信号时,光耦输出侧处于导通状态,饱和导通状态的输出光控三极管使触发电路中的小晶闸管V_{Ti}(i=1,2,3,4)的门极与阴极短路,导致其一直处于截止状态,交流侧电流流经R_4、R_5、R_6和R_7,电阻R_i(i=4,5,6,7)的选择同样保证了触发电路中电阻R_1和R_2上的电压均低于反并联晶闸管的触发电压,使反并联晶闸管关断截止。监控单元通过触发电路实现了对反并联晶闸管模块的导通与关断控制。

Ⅱ档位触发电路组件参数选择与Ⅰ、Ⅲ档位类似,此处不再赘述。

笔者对Ⅱ档位触发电路同样进行了测试,测试方法同Ⅰ、Ⅲ档位。测试所得Ⅱ档位分接开关两端电压波形如图6所示,灯盘负载两端波形如图7所示。由图6、图7可知,反并联晶闸管正向及反向重复峰值电压较小,触发电路工作正常。

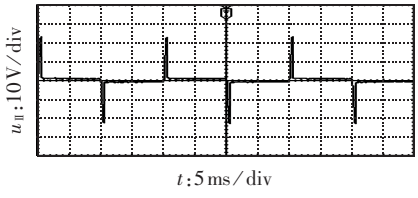

图6 Ⅱ档位OLTC两端电压波形图

Fig.6 Voltage waveform of OLTC for Tap Ⅱ

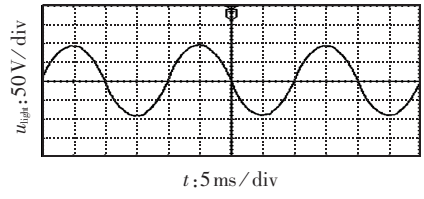

图7 Ⅱ档位分接开关作用下灯盘负载两端电压波形图

Fig.7 Voltage waveform of lamp load, with OLTC for Tap Ⅱ

3 自动空气开关的选择

图1中,自动空气开关的作用是在正常运行时接通电路,当出现过流时无延时断开,切断过电流。在选择自动空气开关时,既要考虑其额定电流要大于正常工作时通过的电流,又要留有较大裕量,并在出现短路故障时能够迅速跳闸,切断故障电流,且应具有足够的绝缘强度。

本文方案将2个三相空气开关分别置于Ⅰ、Ⅲ档

位分接头与其相对应的分接开关之间,实验室采用的 S11-50 kV·A-10/0.4 kV 型配电变压器,高压侧额定电流为 2.89 A,根据文献[17]可计算出该变压器高压侧环流峰值最高为 210 A。

DZ47-60 型自动空气开关适用于交流 50 Hz/60 Hz,额定工作电压 400 V、额定工作电流 60 A 的配电网络电路中,用来分配电能和保护线路及电气设备免受过载、短路、欠电压等故障的损坏,具有体积小、分断能力强、飞弧短等特点,其过流保护特性如表 3 所示(表中,I_N 为额定电流),脱扣特性曲线如图 8 所示。

表 3 DZ47-60 型空气开关过流保护特性

Table 3 Over-current protection characteristics of air switch DZ47-60

序号	I_N/A	实验电流/A	规定时间	预期结果	备注
1	1~60	$1.13I_N$	$t\leqslant 1$ h	不脱扣	—
2	1~60	$1.45I_N$	$t<1$ h	脱扣	—
3	1~32	$2.55I_N$	1 s$<t<$60 s	脱扣	—
	40~60	$2.55I_N$	1 s$<t<$120 s	脱扣	—
4	1~60	$5I_N$	$t\leqslant 0.1$ s	不脱扣	C 型
5	1~60	$10I_N$	$t<0.1$ s	脱扣	C 型
6	1~60	$10I_N$	$t\leqslant 0.1$ s	不脱扣	D 型
7	1~60	$16I_N$	$t<0.1$ s	脱扣	D 型

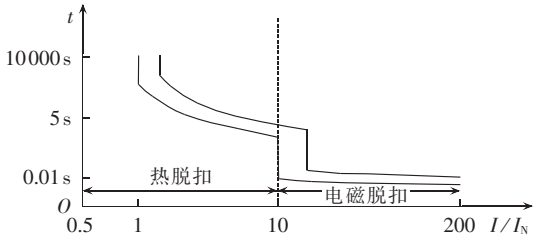

图 8 DZ47-60 型空气开关脱扣特性曲线

Fig.8 Characteristic curves of air switch DZ47-60 for trip-out

从表 3 和图8 可以观察到 DZ47-60 型自动空气开关具有高限流能力,从而最大限度地限制了短路所造成的破坏性能量。图 8 所示脱扣特性曲线横坐标为实际电流与额定电流的比值,以空气开关额定电流 I_N=10 A 为例,当流过自动空气开关的电流为额定电流的 10 倍即 100 A 时,自动空气开关在 0.01 s 至 5 s 之间动作。考虑到 MTC 92-20 型反并联晶闸管模块所能承受的最大通态电流为 90 A,且要求在出现过流时自动空气开关能在一个周期(0.02 s/50 Hz)内动作,以保护反并联晶闸管模块不被击穿,过流保护单元采用 DZ47-60-3P-D5 型自动空气开关,其额定电流为 5 A。

4　整机实验结果及分析

实验目的:验证分接开关在变换分接头过程中或在正常运行时,若调压绕组出现较大过电流,保护的可行性。

实验方法:改变调压器 T_t 的输出电压模拟电网电压变化,使分接开关自动调节分接头,并在控制程序中设置指定档位的变换过程不经过渡支路,直接进行变换,这样原来导通的分接开关在电流过零前仍然导通,而待触发的分接开关在电压过零点触发导通,致使两分接头短路而产生环流,观察此时空气开关是否跳闸,配电变压器能否自动恢复到额定分接头继续供电运行,若空气开关自动跳开,变压器高压侧保持在额定分接头继续运行,则表明该分接开关能起到保护作用,否则不能。实验由三相变阻箱和带可抽动铁芯电感器模拟用电负荷, 整机实验接线如图 9 所示。

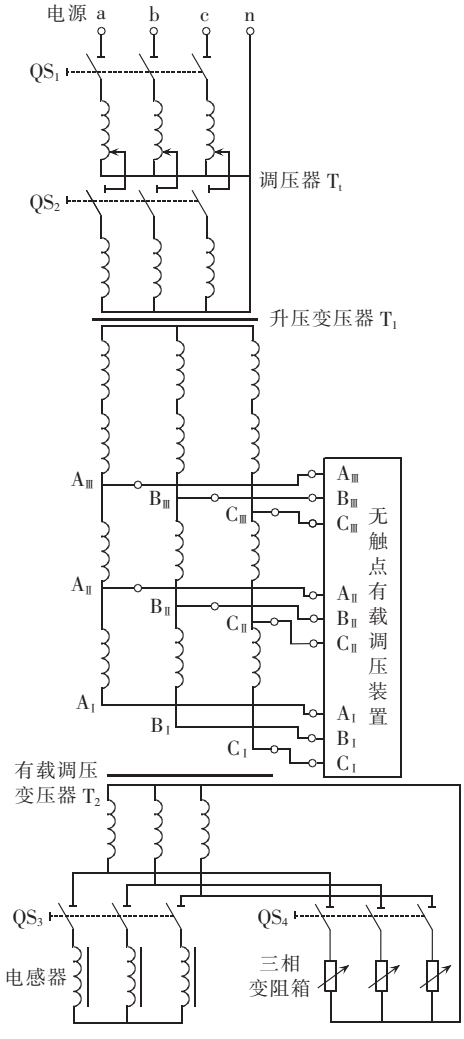

图 9 整机实验接线图

Fig.9 Experimental wiring diagram for whole equipment

保护实验中,有载调压变压器 T_2 的负载电压在 380×(1±5%)~420×(1±5%)V 之间波动时,分接开关档位不变; 有载调压变压器 T_2 的负载电压低于 380 V 或高于 420 V 时,分接开关档位进行相应变换,以变压器 T_2 一次侧分接头初始时在Ⅱ档位为例,当负载电压低于 380 V 时, 分接头将由Ⅱ档位变换

为Ⅲ档位,变压器一次侧绕组匝数减少,负载电压升高;而当负载电压高于420 V时,分接头则由Ⅱ档位变换为Ⅰ档位,变压器一次侧绕组匝数增加,负载电压降低。实验测试结果如表4所示。

此外,采用该分接开关的配电变压器样机在哈尔滨格瑞德电力成套设备有限公司生产车间内,利用车间生产设备作为负荷,进行了运行考核测试。通过增加或减少负载,使变压器输出电压随之降低或升高,当超出设定允许范围时,分接开关自动变换导通状态,变压器输出电压恢复到允许范围,这说明负荷变化时将导致分接头之间电压变化,因此,可以根据其电压的变化进行有载调压。样机于2015年6月相继在哈尔滨格瑞德电力成套设备有限公司作为厂用电变压器和在黑龙江省高楞电业局作为公用变挂网运行,稳压效果明显,元件参数的选择和电路保护的设置完全满足供电要求。

表4 整机实验结果

Table 4 Experimental results

操作	T_1输出线电压/V	自动变档	取消过渡支路设定	$AS_Ⅰ$	$AS_Ⅲ$	监控系统	分接开关工作档位	T_2输出线电压/V	备注
第1次上电启动	394	—	—	ON	ON	运行	Ⅱ	394	—
手动调压	425	Ⅱ→Ⅰ	Ⅱ→Ⅰ	OFF	ON	退出	Ⅱ	425	保护成功
第2次上电启动	407	—	—	ON	ON	运行	Ⅱ	407	—
手动调压	371	Ⅱ→Ⅲ	Ⅱ→Ⅲ	ON	OFF	退出	Ⅱ	371	保护成功
第3次上电启动	401	—	—	ON	ON	运行	Ⅱ	401	—
手动调压	431	Ⅱ→Ⅰ	—	ON	ON	运行	Ⅰ	409	自动稳压
手动调压	378	Ⅰ→Ⅱ	Ⅰ→Ⅱ	OFF	ON	退出	Ⅱ	378	保护成功
第4次上电启动	399	—	—	ON	ON	运行	Ⅱ	399	—
手动调压	376	Ⅱ→Ⅲ	—	ON	ON	运行	Ⅲ	397	自动稳压
手动调压	422	Ⅲ→Ⅱ	Ⅲ→Ⅱ	ON	OFF	退出	Ⅱ	422	保护成功

5 结语

本文提出的具有保护功能的分接开关,经实验室整机保护实验及现场带负荷运行考核,得出如下结论:

(1)采用自动空气开关作为调压回路的保护元件,具有动作迅速、工作可靠及工程适用等特点;

(2)Ⅱ档位分接开关采用自取能无源触发方式,Ⅰ、Ⅲ档位元件损坏后,变压器可在该档位继续运行,保证了供电可靠性的问题,同时也解决了装置的启动问题,使主电路结构更加简单可靠,降低了系统造价;

(3)分接开关中Ⅱ档位开关元件承受的电压较低,但为了保证其工作可靠性,不出现击穿损坏,采用和Ⅰ、Ⅲ档位相同的元件,可以保证安全可靠运行;

(4)当变压器负荷变化引起输出电压变化时,高压侧分接头之间电压也随之发生改变,进而可以根据分接头之间电压的变化进行有载调压;

(5)本文所提分接开关的控制电路位于高压侧,控制对象也处于高压侧,因此,从根本上解决了控制回路与高压侧的耐压问题。

参考文献:

[1] 李晓明,黄俊杰,尹项根,等. 平滑无冲击电力电子有载调压装置[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):45-48.
LI Xiaoming,HUANG Junjie,YIN Xianggen,et al. Research of smooth and non-impact power electronics OLTC[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(10):45-48.

[2] 吕艳玲,赵玉林,徐建华,等. 基于固态继电器的配电变压器自动稳压装置[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):74-77.
LÜ Yanling,ZHAO Yulin,XU Jianhua,et al. Solid-state relay based automatic voltage stabilizing device for distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(24):74-77.

[3] 王金利,李金元,徐腊元,等. 大功率电力电子开关用于配电变压器无弧有载调压方案[J]. 电力系统自动化,2006,30(15):97-102.
WANG Jinli,LI Jinyuan,XU Layuan,et al. Scheme of arcless on-load voltage regulation for distribution transformer using high power electronic switch[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(15):97-102.

[4] 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 Agriculture University,2009.

[5] 张伟,张志杰,宋欣原,等. 一种新型有载调压转换开关的研制[J]. 变压器,2010,47(9):34-36.
ZHANG Wei,ZHANG Zhijie,SONG Xinyuan,et al. Development of new on-load tap changer[J]. Transformer,2010,47(9):34-36.

[6] 李孟超,苏涛,吴建辉,等. 基于变压器有载分接开关的研究[J]. 变压器,2012,49(2):59-60.
LI Mengchao,SU Tao,WU Jianhui,et al. Based on the research of transformer on-load tap-changer[J]. Transformer,2012,49(2):59-60.

[7] 李晓明,王琬晴,张水长,等. 基于"臂-桥"结构的无弧有载调压模型[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):55-59.
LI Xiaoming,WANG Wanqing,ZHANG Shuichang,et al. An arcless OLTC model based on arm-bridge structure[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):55-59.

[8] 潘晓杰,刘涤尘,任冲,等. 一种研究电压稳定的有载调压变压器模型[J]. 高电压技术,2006,32(2):21-23.
PAN Xiaojie,LIU Dichen,REN Chong,et al. OLTC model for

studing voltage stability[J]. High Voltage Engineering,2006,32(2):21-23.

[9] 黄俊杰,李晓明. 基于电力电子技术有载调压变压器的无冲击调压方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(10):69-73.
HUANG Junjie,LI Xiaoming. Non-inrush voltage regulating method for OLTC transformer based on power electronic technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(10):69-73.

[10] 赵玉林,董守田,梁秋艳,等. 基于固态继电器的无触点有载自动调压配电变压器的研究与实现[J]. 电气技术,2010,11(8):178-181.
ZHANO Yulin,DONG Shoutian,LIANG Qiuyan,et al. Research and implementation of non-contact on-load automatic regulate voltage distribution transformer based on solid-state relay[J]. Electrical Engineering,2010,11(8):178-181.

[11] 黄俊杰,李晓明. 基于动态模型的无触点有载调压系统[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):52-57.
HUANG Junjie,LI Xiaoming. Contactor-less OLTC system based on dynamic model[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(8):52-57.

[12] 陈磊,赵乐. 一种低压侧有载调压变压器设计方案的研究[J]. 能源研究与管理,2015,32(1):50-53.
CHEN Lei,ZHAO Le. Study on one transformer design proposal with on load tap changer at low voltage side[J]. Energy Research and Management,2015,32(1):50-53.

[13] 宁志毫,罗隆福,张杰,等. 一种用于中高压静止无功补偿的晶闸管光纤触发改进电路及其设计[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):31-34.
NING Zhihao,LUO Longfu,ZHANG Jie,et al. Design of optical fiber trigger system for thyristor in medium-high voltage static reactive power compensation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):31-34.

[14] 魏海啸,于群. 基于 AT89C2051 的晶闸管触发电路设计[J]. 电子设计工程,2012,20(1):161-163.
WEI Haixiao,YU Qun. Design of SCR tirgger based on AT89C2051 microcomputer[J]. Electronic Design Engineering,2012,20(1):161-163.

[15] 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.
ZHANO 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.

[16] 赵玉林,李丽贞,李海凤,等. 无触点有载调压配电变压器光纤启动方案[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):89-94.
ZHAO Yulin,LI Lizhen,LI Haifeng,et al. Optical fiber start scheme in contactless distribution transformer with OLTC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):89-94.

[17] 姚欣. 无触点有载自动调压配电变压器的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2006.
YAO Xin. Research on non-contact on load automatic voltage regulating distributing transformer[D]. Harbin:Northeast Agriculture University,2006.

作者简介:

赵玉林

赵玉林(1956—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为电力系统自动化;

牛泽晗(1990—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化(**E-mail**:niuzehan007@163.com);

李海凤(1988—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化;

汪　清(1993—),女,黑龙江富锦人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化。

Contactless OLTC with protective function for power distribution transformer

ZHAO Yulin,NIU Zehan,LI Haifeng,WANG Qing

(School of Electrical Engineering and Information,Northeast Agriculture University,Harbin 150030,China)

Abstract: A kind of contactless OLTC(On Load Tap Changer) is designed,which applies a low-pressure air switch in its voltage-regulating winding for over-current protection to avoid the damage due to the winding short circuit caused by the breakdown of power electronic components. By the cooperation among low-pressure air switch,special triggering circuit and monitoring system,when any group of power electronic components is broken down,the on-load voltage-regulating function is blocked and the transformer is automatically recovered to operate at the rated tap,which ensures the reliability of power supply. The experimental results show that,the voltage-regulating winding of the contactless OLTC designed is protected when a circulating current occurs at the primary side of distribution transformer and the transformer operates at the rated tap;during the normal operation of distribution transformer,the designed contactless OLTC adjusts its output voltage automatically according to the variation of load voltage.

Key words: distribution transformer; contactless; tap-changer; protective function; trigger circuit; air switch