

无触点有载调压配电变压器光纤启动方案

赵玉林¹, 李丽贞¹, 李海凤¹, 赵琦²

(1. 东北农业大学 电气与信息学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 2. 国网哈尔滨供电公司变电检修室, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 提出一种以双向晶闸管(TRIAC)作为启动开关, 基于光纤触发的无触点有载调压配电变压器启动方案。该方案中启动电路与变换分接头时的过渡回路共用 1 个支路: 上电时该支路投入, 启动变压器工作; 变换分接头时, 该支路投入, 将过渡电阻串入分接头变换过渡回路, 限制环流。启动或分接头变换完成后, TRIAC 截止, 该支路退出。双向晶闸管触发电路采用高压自取能随机触发方式, 电路简单, 工作可靠。针对该方案进行了主要电子元件的选型及参数的设计并进行了模拟实验。实验结果表明, 该方案的电路设计及元件参数选择方法能满足无触点有载调压配电变压器对启动单元和过渡支路的要求。

关键词: 有载调压; 变压器; 启动单元; 双向晶闸管; 光纤触发; 自取能

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.015

0 引言

电力电子元件开关具有可频繁通断、无电火花、寿命长的优点, 因此可作为配电变压器的有载调压分接开关^[1-10]。传统的电力电子开关触发电路存在电气隔离问题, 将光纤通信技术应用于中高压触发电路可有效解决高低压电气隔离问题^[11-16]。

文献[11]中无触点有载自动调压配电变压器分接开关晶闸管(SCR)的通断由控制系统控制, 而控制系统正常工作需配电变压器提供电源。上电前, 变压器不输出电压, 故必须设计一个启动电路, 使得变压器在上电前或上电过程中高压侧中性点与 1 组分接头连在一起, 变压器投入工作。变压器上电运

行低压侧输出电压, 控制系统投入工作后, 启动电路自动退出。采用蓄电池启动方式, 具有电路简单、易实现的优点, 但当变压器出厂或停电超过 8 h 后, 蓄电池启动方案可靠性较低^[17]。利用独立支路交流接触器的常闭触点在变压器上电前将中性点与其中 1 组分接头连在一起的启动方式, 原理简单, 但交流接触器的线圈接在变压器低压侧, 触点接在高压侧, 其耐压无法满足高低压电气隔离的要求, 同时上电励磁涌流易损坏触点, 导致启动不可靠。

本文基于原有 SCR 光纤触发方案及启动方式, 考虑启动和变换分接头时限制环流的要求, 提出一种将启动支路与变换分接头时限制环流的过渡支路共用 1 条支路的光纤启动方案。该方案选用双向晶闸管(TRIAC)作为启动开关, 采用高压自取能方式, 在上电或变换分接头过程中, TRIAC 导通, 实现启动功能或将限流过渡支路串入调压回路限制调压过程中的环流功能; 当启动完毕或变换分接头完成后, TRIAC 在光纤传输的光信号作用下截止, 该单元退出工作。

1 启动与调压过程

图 1 为无触点有载调压配电变压器主接线图,

Analysis of PWM pulse width error and modeling of grid-connected inverter in HIL simulation system

YIN Chenxu¹, LIU Bang¹, XIONG Xuan², PI Yichen¹, SUN Jianjun¹, ZHA Xiaoming¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410015, China)

Abstract: The PWM pulse width error induced by the sampling section of digital simulator in HIL(Hardware-In-the-Loop) simulation system may delay the switching operation of the inverter model in the digital simulator, which impacts on the stability and accuracy of HIL system. With the close-loop control system of grid-connected inverter as an example, the phase plane method is introduced to build the hybrid simulation model closer to actual system for the HIL simulation system. The correctness and effectiveness of the proposed modeling method and stability analysis method are verified by the simulative results.

Key words: hardware-in-the-loop; pulse width modulation; pulse width error; nonlinear element; phase plane method; electric inverters; model buildings

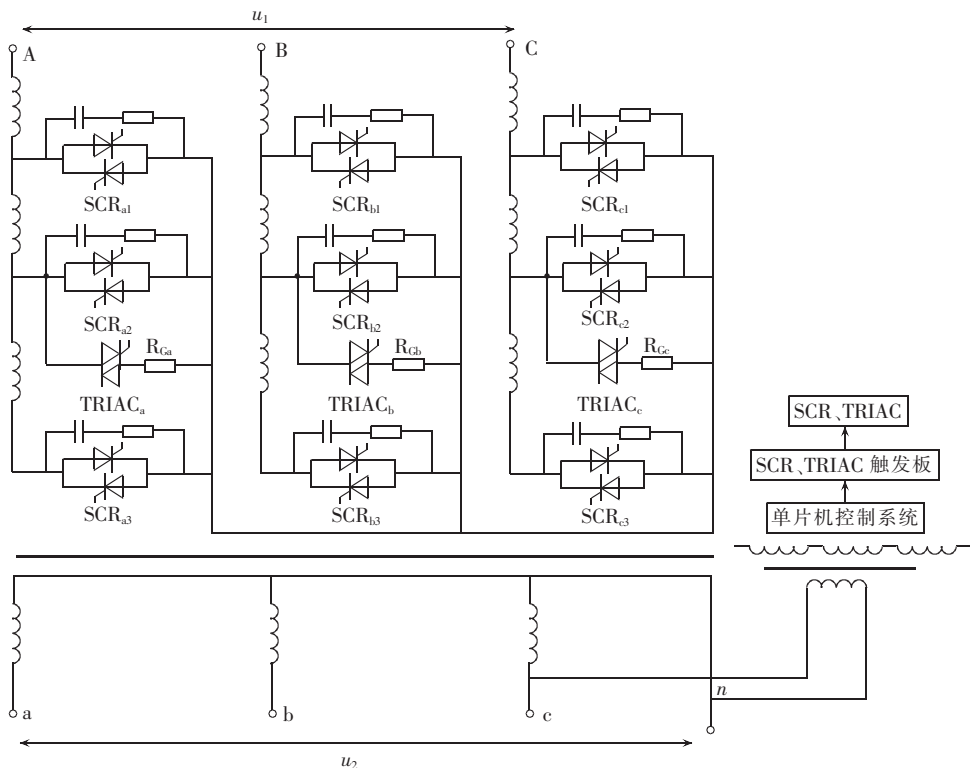


图 1 无触点有载调压配电变压器主接线图
Fig.1 Main circuit of contactless distribution transformer with OLTC

其中 TRIAC 所在支路即为启动过渡支路。

a. 该支路作为启动机构时工作过程为:变压器上电,TRIAC_{a/b/c} 导通,变压器二次侧得电开始运行,控制系统工作,触发额定分接开关 SCR_{a2/i2/c2} 导通,经过一定延时,在光纤传输的光信号作用下,TRIAC_{a/b/c} 截止退出,变压器开始正常工作。

b. 该支路作为过渡支路时,以额定分接开关向 95% 分接开关转换的情况为例,工作过程为:先导通 TRIAC_{a/b/c},断开 SCR_{a2/i2/c2},然后导通 SCR_{a1/i1/c1},最后断开 TRIAC_{a/b/c},从而完成一次分接开关的转换。

2 光纤触发启动方案

2.1 启动总体方案

光纤触发启动总体方案结构如图 2 所示,主要包括光纤传输电路、触发电路和高压取能供电电路 3 个部分。

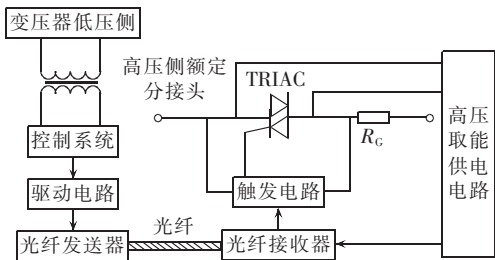


图 2 基于光纤触发的启动方案结构图
Fig.2 Structure of start-up scheme based on optical fiber trigger

上电前,变压器低压侧无电压,控制系统不工作,光纤中没有光信号传输。触发电路在 TRIAC 两端电压的作用下发出触发信号,TRIAC 导通,变压器高压侧 A、B 和 C 三相绕组中性点连在一起,变压器投入工作。有载调压控制系统正常工作后,通过光纤发出使启动功能退出的控制信号,TRIAC 截止,启动电路退出工作。

2.2 光纤传输电路

本文采用 HFBR-1521 和 HFBR-2521 分别作为光信号的发送器和接收器,它们都有标准的接口,便于选择配套光纤。其传输电路如图 3 所示。进行实验室模拟试验时,光纤发送器采用电源模块供电,光纤接收器采用耦合取能电源供电。

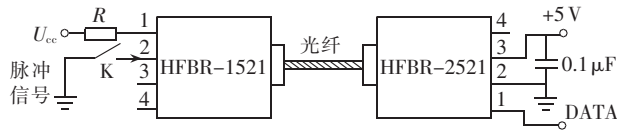


图 3 光纤传输电路
Fig.3 Optical fiber transmission circuit

2.3 启动电路

文献[14]中的反并联晶闸管光纤触发电路如图 4 所示,图中,OC 表示光耦。该电路实现功能为:得到光信号,反并联晶闸管导通;失去光信号,反并联晶闸管截止。在该电路的基础上,选用 TRIAC 作为启动电路的控制开关进行 TRIAC 光纤启动电路的

设计。

由于稳压芯片 L7805 功耗大,不易得到所需+5 V 直流电源,故可用稳压管替代。三极管所接直流电源不是恒值,导致其工作状态不易控制,故用稳压管得到的+12 V 替代。而所需启动电路实现的功能恰好与触发电路相反,故增设 1 个三极管。最终得到的启动电路如图 5 所示,该电路包括触发电路、耦合取能电路两部分。

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,TRIAC 所承受的最高工作电压有效值为:

$$\frac{11000}{\sqrt{3}} \times 5\% = 317.55 \text{ (V)}$$

为保证可靠性,选取额定电压 1600 V 的 TRIAC。由于小型晶闸管耐受电压为 800 V,考虑电路的安全裕度,采用晶闸管串联的方式提高电路耐压能力。启动电路作为过渡支路与额定分接开关并联,当负载感性成分较大时,额定分接开关两端电压幅值与流过电流的幅值如图 6 所示。由图 6 可知若采用过零触发方式,当额定分接开关电流过零截止时,

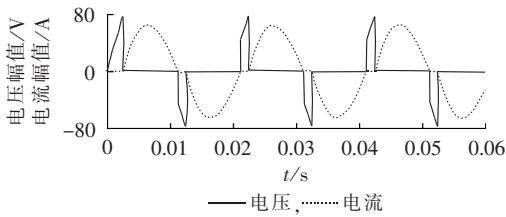


图 6 分接开关电压、电流幅值波形图
Fig.6 Waveforms of voltage and current amplitude of tap

此时加在过渡支路两端的电压有可能超出过零触发电压范围,导致其不能可靠触发导通。因此,本设计采用随机触发方式,以保证过渡支路的可靠触发导通。

要使光纤接收器正常工作,需要解决+5 V 直流电源问题,本设计采用高压自取能方式。根据 TRIAC 周期性导通与截止的特点,利用短暂截止时加在其两端的交流电压作为直流电源的获取通道。

2.4 工作原理

触发电路正常工作包括上电触发导通和光纤触发截止 2 个过程。

上电触发导通原理如下:在给变压器上电的瞬间,TRIAC 承担一定数值的电源电压。电源电压通

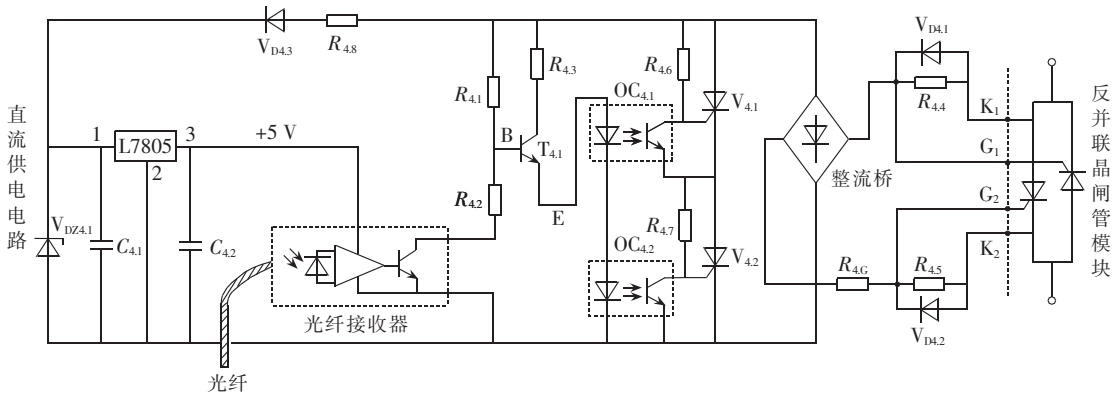


图 4 反并联晶闸管光纤触发电路
Fig.4 Optical fiber trigger circuit with anti-parallel thyristor

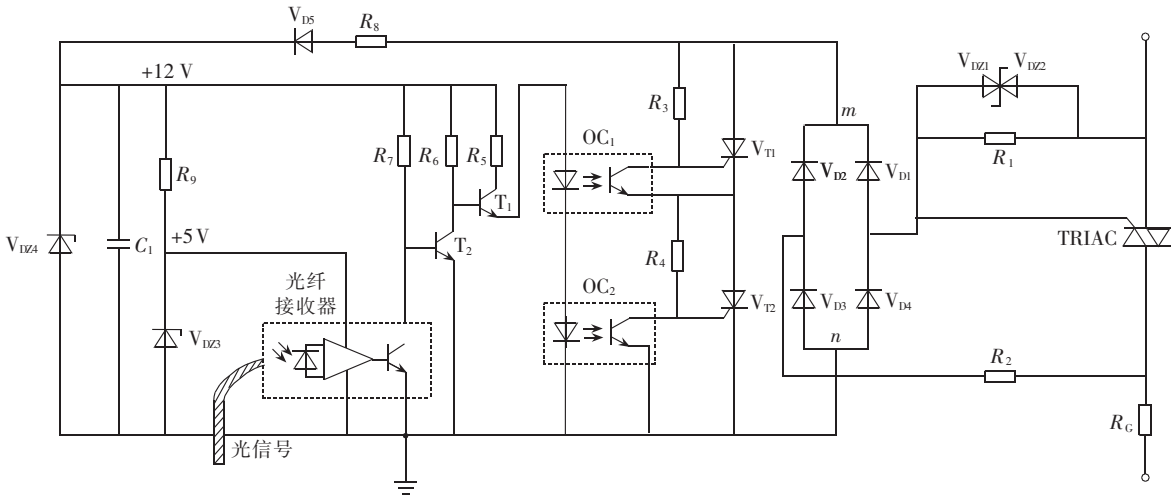


图 5 光纤触发启动电路图
Fig.5 Optical fiber trigger start-up circuit

过 TRIAC、 R_1 、二极管整流桥($V_{D1}\text{—}V_{D4}$)以及 R_3 、 R_4 构成回路。当 m 、 n 两端电压从 0 开始升高至设定值 $U_{nm}=29\text{ V}$ 时,由于 T_2 导通, T_1 截止, OC_1 、 OC_2 截止, V_{T1} 、 V_{T2} 恰好导通,然后 TRIAC 两端电压达到额定设置值 35 V 时, R_1 两端电压达到 TRIAC 的门极触发电压,TRIAC 触发导通。

光纤触发截止原理如下:本文设计当 TRIAC 两端电压为 35 V 时,控制电压刚好使其导通。为了保证在发出光纤控制信号时,该 TRIAC 能保持关断状态,必须使光纤接收器在 U_{nm} 达到小于 35 V 的某个数值(设定为 27 V)时能正常工作,即 V_{DZ3} 稳压输出 $+5\text{ V}$ 直流电压为光纤接收器提供工作电源;光纤接收器接收到光纤发送器传来的光信号, T_2 截止, OC_1 、 OC_2 导通,使 V_{T1} 、 V_{T2} 门极与阴极间电压钳制为 0 而截止,此时 R_1 两端电压低于 TRIAC 的门极触发电压,TRIAC 在电流接近 0 时截止。

电源获取原理如下:交流电压经过整流桥、 R_8 的限流分压、齐纳二极管 V_{DZ4} 的限压和 C_1 的滤波,从而输出 $+12\text{ V}$ 直流电源, $+12\text{ V}$ 直流电源再经过稳压得到 $+5\text{ V}$ 直流电源。为了快速获取直流电压,需合理设置与充电时间参数有关的 R_8 、 C_1 的值。

3 元件参数设计与实验验证

3.1 元件参数设计

本实验按图 3、图 5 所示电路进行,实验电压取 110 V 并由调压器提供,TRIAC 和调压器相连,脉冲信号的通断通过安装手动控制开关 K 进行控制。光纤触发启动机构实验电路中主要器件选型及参数见表 1。

表 1 光纤触发启动电路元件选型及主要参数
Table 1 Element type selection and main parameters of optical fiber trigger start-up circuit

器件名	型号	参数	参数值
TRIAC	KS20-16	门极触发电流 I_{GT}	20 mA
		门极触发电压 U_{GT}	1 V
		最大不导通门极电压 U_{GD}	250 mV
$V_{D1}\text{—}V_{D4}$	1N4007	正向电压降 U_{F1-4}	1 V
$V_{IZ1}\text{—}V_{IZ3}$	1N4733	稳定电压 U_{Z1-3}	5.1 V
V_{D5}	1N4001	正向电压降 U_{F5}	1 V
V_{IZ4}	1N4742	稳定电压 U_{Z4}	12 V
V_{T1} 、 V_{T2}	MCR100-8	饱和导通电压 U_{FVT}	1.7 V
		门极触发电流 I_{GIVT}	0.2 mA
		门极触发电压 U_{GIVT}	0.8 V
		基极发射极电压 U_{BEVT}	0.3 V
OC_1 、 OC_2	TLP521-4	维持电流 I_H	5 mA
		正向电流 I_F	50 mA
		正向压降 U_{IF}	1.2 V
三极管 T_1 、 T_2	3DG27DJ	集电极最大电流 I_{CM}	300 mA
		基极发射极导通压降 U_{BET}	0.7 V
		集电极发射极饱和压降 U_{CES}	0.3 V
		电流放大倍数 β	70
电容		C_1	0.1 μF

在 TRIAC 短暂截止期间,为了快速得到所需直流电源, R_8 应尽量小,同时还应考虑功率的选择。

本文通过仿真及模拟实验进行选择及验证,当 $U_{nm}=27\text{ V}$ 、 $R_8=5\text{ k}\Omega$ 、 $C_1=0.1\text{ }\mu\text{F}$ 时, C_1 电压波形如图 7 所示,可见本文设计满足要求。

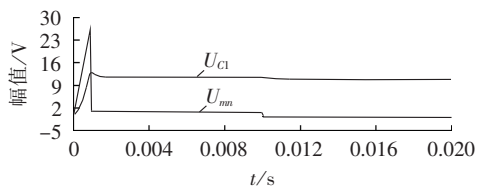


图 7 $R_8=5\text{ k}\Omega$ 、 $C_1=0.1\text{ }\mu\text{F}$ 时, C_1 电压波形图
Fig.7 Waveform of voltage of C_1 when $R_8=5\text{ k}\Omega$ and $C_1=0.1\text{ }\mu\text{F}$

触发电阻 R_1 和 R_2 的取值与 TRIAC 的参数有关。设定 TRIAC 触发导通前两端电压 $U_{AK}=35\text{ V}$,考虑触发的可靠性,采用强触发方式,则 R_1 和 R_2 需满足:

$$\frac{U_{AK}-2U_{FVT}-2U_{F1-4}}{R_1+R_2}R_1=U_{GT}\tag{1}$$

$$\frac{U_{AK}-2U_{FVT}-2U_{F1-4}-U_{GT}}{R_2}\geq 10I_{GT}\tag{2}$$

当不给光信号,对于上电触发电路,设定当 $U_{nm}=29\text{ V}$ 时,要恰好使 V_{T1} 、 V_{T2} 导通,且 T_2 导通、 T_1 可靠截止,则 R_3 、 R_4 需满足:

$$\frac{29-U_{BEVT}}{R_3+R_4}=I_{GIVT}\tag{3}$$

R_6 、 R_7 需满足 T_2 工作在饱和导通的状态下,约束条件为:

$$\frac{12-U_{BET}}{R_7}\geq \frac{12-U_{CES}}{\beta R_6}\tag{4}$$

提供光信号时, T_1 导通, R_5 应尽量小,使流过 OC_1 、 OC_2 的电流快速达到额定工作值,同时 R_5 、 R_6 的取值需满足 T_2 工作于饱和导通状态且将流过 OC_1 、 OC_2 的电流限制在输入电流 I_1 以下,则有:

$$12-\frac{12-U_{BET}-2U_{IF}}{R_6}\beta R_5-2U_{IF}\leq U_{CES}\tag{5}$$

$$\frac{12-2U_{IF}-U_{CES}}{R_5}<I_1\tag{6}$$

其中, β 为 T_1 的电流放大系数。

TRIAC 截止时,为避免其误导通,则要求:

$$\frac{110\sqrt{2}}{R_3+R_4}+\frac{110\sqrt{2}-U_{Z4}-U_{F5}}{R_8}\leq \frac{U_{GD}}{R_1}\tag{7}$$

根据上述分析及式(1)—(7),选择各电阻参数如表 2 所示。

3.2 实验与结果分析

按照表 2 选择的电阻参数进行实验。将图 5 中的限流电阻 R_G 用灯泡代替,在 TRIAC 与灯泡的串联电路两端施加 110 V 电压,光纤发送器通过控制开

表 2 光纤触发启动电路中电阻参数
Table 2 Resistance parameters of optical
fiber trigger start-up circuit

电阻	阻值/kΩ	电阻	阻值/kΩ
R_1	0.005	R_5	5
R_2	0.143	R_6	10
R_3	67.500	R_7	10
R_4	67.500	R_8	5

关 K 接在 +5 V 直流电源上。当 K 断开时,合上 110 V 电源,灯泡亮,表明 TRIAC 导通,说明如果该开关接在变压器中性点上时,变压器上电时可以启动变压器工作。当开关 K 闭合时,光纤发送器将电信号转变为光信号,通过光纤传送到光纤接收器,结果使处于发光的灯泡关闭。该结果说明该电路能在配电变压器启动,控制系统正常工作后自动退出,避免了调压过程中环流的产生。

同时测得 TRIAC 触发导通后负载电压幅值如图 8 所示。由图中负载波形可见其畸变程度较小,说明启动机构工作正常。设计的实验电路能够可靠工作,设计的光纤触发启动机构原理可行。

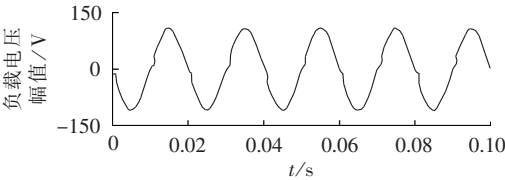


图 8 负载电压幅值波形图
Fig.8 Waveform of load voltage amplitude

4 结语

本文根据 TRIAC 触发导通及截止条件,设计了一种配电变压器光纤触发启动方案。该方案设计主要包括耦合取能及触发电路两部分,具有如下特点。

- a. 通过光纤传输的光信号并采用随机触发方式控制 TRIAC 的通断,在感性负载较大时保证 TRIAC 快速导通,同时使配电变压器高压侧与低压控制系统间具有良好的电气隔离效果。
- b. 将启动支路与过渡支路相结合,简化电路的同时又可有效抑制配电变压器上电时的励磁涌流。
- c. 采用高压耦合取能方式,利用功耗小的稳压管从 TRIAC 两端获取所需直流电源,便捷可靠。
- d. 当分接头之间电压不同时,可根据式(1)―(7)选择电路元件参数,而电路拓扑结构不变。

经过实验验证,上电后 TRIAC 启动机构可靠启动,同时控制系统可以通过光纤信号控制启动机构的工作状态,实现其同时作为过渡支路的功能。在实际应用中,根据具体需要进行公式计算,合理选择所需元件参数,方可实现该启动机构的功能。

参考文献:

[1] ABBASZADEH K,ARDEBILI M,ALAEI A R. Design and built of on-load fully electronic tap-changer with TRIAC switch:simulation and practical results[C]//1st Power Electronic & Driver Systems & Technologies Conference. Tehran,Iran:IEEE,2010:340-344.

[2] MEYER A S,van COLLER J. Electronic tap changers for use with ultra-light rural distribution lines[C]//1999 IEEE Africon. 5th Africon Conference in Africa(Africon'99). Cape Town,South Africa:IEEE,1999:909-912.

[3] FAIZ J,SHAHKOLAH B. New solid-state on-load tap-changers topology for distribution transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2003(1):136-141.

[4] 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 Yu lin,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.

[5] 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.

[6] 李晓明,王琬晴,张水长. 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. An arcless OLTC model based on arm-bridge structure[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):55-59.

[7] 王金利,李金元,徐腊元. 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. 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.

[8] 樊慧贞. 一种新型电力变压器有载分接开关的研究[J]. 变压器,2008,45(5):64-66.
FAN Huizhen. Research on a new on-load tap changer for power transformer[J]. Transformer,2008,45(5):64-66.

[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] 陈敏. 关于电力电子有载调压分接开关的探讨[J]. 工业技术,2009(3):97-98.
CHEN Min. Research on power electronics OLTC voltage regulator[J]. Industrial Technology,2009(3):97-98.

[11] 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 a new on-load tap changer[J]. Transformer,2010,47(9):34-36.

[12] 黄连生,傅鹏,王林森,等. 光纤通讯技术在晶闸管触发电系统中的应用[J]. 电力电子技术,2007,41(11):44-46.
HUANG Liansheng,FU Peng,WANG Linsen,et al. Applications

- of optical fiber in the thyristor trigger system[J]. Power Electronics, 2007, 41(11): 44-46.
- [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] 刘飞, 卢志良, 刘燕, 等. 用于TCR的晶闸管光纤触发与监测系统[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 123-128.
- LIU Fei, LU Zhiliang, LIU Yan, et al. Thyristor photoelectric firing and monitoring system applied to TCR[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 123-128.
- [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.
- 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.
- [16] 宋伟. 无触点有载调压配电变压器可靠性技术的研究与实现[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- SONG Wei. Research and implementation on the reliability technology of contactless on-load voltage regulating distribution transformer[D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2014.
- [17] 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.

作者简介:



赵玉林

赵玉林(1956—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化 (E-mail: zyl5631@163.com);

李丽贞(1989—), 女, 福建龙岩人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化。

Optical fiber start scheme in contactless distribution transformer with OLTC

ZHAO Yulin¹, LI Lizhen¹, LI Haifeng¹, ZHAO Qi²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Northeast Agriculture University, Harbin 150030, China;

2. State Grid Harbin Power Supply Company Substation Maintenance Room, Harbin 150036, China)

Abstract: A kind of start scheme based on optical fiber trigger is proposed for the contactless distribution transformer with OLTC (On Load Tap Changer), which adopts the TRIAC (TRIode AC semiconductor switch) as the start-up tap. The start-up circuit shares the same branch with the transition branch for tap switch. When the transformer is powered up, the shared branch is put into operation to start it. When the tap is switched, the shared branch is put into operation to connect the transition resistance into the tap switch transition circuit for circuit current limitation. After the transformation is started or the tap switch is completed, the TRIAC is cut-off to quit the shared branch. The TRIAC triggering circuit adopts high voltage self-power-supply mode, which is simple and reliable. The types of main electric elements are selected and their parameters are designed for the proposed scheme, and the simulation experiment is carried on. The experimental results show that the circuit design and element parameter selection method of the proposed scheme can satisfy the requirement of contactless distribution transformer with OLTC for starting unit and transition branch.

Key words: on load tap changing; electric transformers; starting unit; TRIAC; optical fiber trigger; self supply power