

10 kV 配电变压器自动调压的研究以及试验分析

宋开胜¹, 王华芳², 马宏忠¹, 许洪华², 刘宝稳¹, 吴书煜¹, 顾苏雯¹, 杨庆福³

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008;

3. 江苏宏源电气有限责任公司, 江苏 南京 211103)

摘要:针对配电变压器机械式有载调压装置复杂、调压不方便等问题,提出一种基于电力电子开关的5档自动调压技术方案。采用启动保护电路,避免电力电子开关承受合闸电压和励磁涌流冲击,保证电力电子开关退出时变压器的正常运行;考虑变压器高压侧绕组不同接线方式,分析开关器件两端承受的电压以及分接头对地电压的分布情况,为电力电子开关器件的参数选择提供参考。结果表明高压侧为星形接线的中性点调压方式更加有利于电力电子器件的工作,高压侧为三角形接线的中部调压方式对于电力电子器件的工作电压以及隔离电压均有较高的要求。在完成电路设计与器件选型的基础上,研制了基于电力电子开关的自动有载调压变压器,并安装于现场试运行。理论研究、仿真分析、样机试验以及上网试运行均表明所提方案具有可行性与可靠性。

关键词:配电变压器;电力电子开关;自动调压;星三角连接;启动保护

中图分类号:TM 421

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.04.005

0 引言

配电网供电电压受电网波动以及负荷的影响会出现电压越限的问题。电压质量是电能质量的关键考核指标之一,有载调压与无功综合控制可较好地改善电压质量^[1-4]。据国网南京供电公司统计,南京市城区内有2万多台配电变压器,但有载调压配备率低,而目前的有载调压开关一般为机械式分接开关,存在调压装置结构复杂、调压速度慢、易产生电弧和无法对变压器输出电压进行自动调节等问题^[5-8]。电力电子开关具有无电弧、可频繁关断、寿命长等优点,随着电力电子技术的发展,电力电子开关器件容量达到了12 kV/6 kA^[9-11],开关响应速度达到了微秒级^[12-13]。电力电子式自动有载调压取代机械式有载调压是配电网向自动化、智能化发展的必然趋势。

虽然在正常情况下电力电子开关具有寿命长的优点,但是机械式有载分接开关不存在耐压问题,而电力电子器件却不能忽视耐压问题。文献[1]介绍了电力电子器件辅助调压变压器,文献[14-15]提出了基于光纤电路的自动调压方案,文献[16]提出采用辅助变压器的自动调压方案。以上研究有效解决了机械式有载分接开关的电弧问题,但这些方案均未考虑电力电子器件的可靠性问题,阻碍了相关技术的推广应用。研究发现变压器高压侧绕组的接线方式与调压系统的承受电压水平具有强相关性,是选择电力电子开关器件时应考虑的关键问题,但变

压器高压侧绕组的接线方式对电力电子开关两端承受的电压以及分接头对地电压的影响却未见详细论述。

本文考虑调压装置的可靠性以及经济性,通过分析变压器高压绕组的接线方式对电力电子开关两端承受的电压以及分接头对地电压的影响,选出更适合在配电网中使用的固态继电器(SSR)型号,提出一种5档、无弧、快速、平稳的调压方案。针对该方案进行了理论计算、仿真实验以及挂网运行,结果表明了方案的可行性与可靠性。

1 电力电子自动调压系统原理

1.1 调压系统接线及控制策略

电网潮流的变化或者变压器负荷的增减都会导致变压器的二次侧电压发生变化。本文研制的自动调压系统的控制核心为STM32F103ZET6型单片机,通过监测变压器二次侧电压,将二次侧电压与系统整定的调压范围进行对比,通过控制SSR的通断来改变分接头的档位,以增大或减小变压器一次侧绕组匝数,达到调节二次侧电压的目的。

从可靠性与经济性角度考虑,调压系统的设计方式遵循以下5个原则:

- a. 为防止二次侧电压由越下限过渡为越上限、由越上限过渡为越下限或者电压上升率过高,调压系统只允许相邻分接头之间的档位调节;
- b. 保证调节过程中变压器高压侧回路中始终存在过渡电阻,限制过渡环流的幅值,调节结束过渡电阻退出;
- c. 尽量减少SSR和过渡电阻的用量,提高电力电子调压系统的可靠性和经济性;
- d. 设计保护电路,解决启动过程对开关器件造

收稿日期:2018-12-24;修回日期:2019-03-18

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2017069)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2017069)

成的冲击问题;

e. 保证 SSR 有充分的时间进行断开和闭合,避免调节过程中出现电压中断的现象。

根据以上原则设计的调压系统如图 1 所示(图中为单相原理图,实际调压装置为三相)。图中, A 表示 A 相电压输入端; K 表示 A 相 SSR 的公共接线端; X 表示 A 相中性点; R_q 为变压器启动保护支路电阻; R_g 为过渡支路电阻,其作用为限制过渡过程中的环流; SSR 的触发方式为随机触发,其两端并联 RC 阻容吸收电路,限制切换过程中产生的过电压; K_A 为中间继电器,额定电流为 40 A。变压器工作在 5 档时二次侧输出电压最高,工作在 1 档时二次侧输出电压最低,档位升高时变压器二次侧电压升高,且调压系统在相邻档位之间的切换过程相同。调压系统调档控制逻辑如式(1)所示。

$$n(k+1) = \begin{cases} n(k)+1 & U_2 < U_{2min} \text{ 且 } n(k) \leq 4 \\ n(k)-1 & U_2 > U_{2max} \text{ 且 } n(k) \geq 2 \\ n(k) & \left| U_2 - \frac{U_{2max} + U_{2min}}{2} \right| \leq \frac{U_{2max} - U_{2min}}{2} \\ n(k) & U_2 < U_{2min} \text{ 且 } n(k) = 5 \\ n(k) & U_2 > U_{2max} \text{ 且 } n(k) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_2 为采集处理后的二次侧电压有效值; U_{2max} 和 U_{2min} 分别为二次侧电压允许范围的上、下限; $n(k)$ 为第 k 次调压后变压器所处的工作档位,当调压系统工作在 1 档且还需要向下调节,或者工作在 5 档且还需要向上调节时,系统会保持在当前工作档位,并发出预警信息通知配电工作人员。假设目前工作在 4 档,系统监测到二次侧电压低于整定电压下限,发出升压调节命令,其动作过程为:触发导通过渡 SSR → 触发关断 SSR_4 → 触发导通 SSR_5 → 触发关断过渡 SSR。相邻动作过程之间的时间间隔可在系统中进行调节,调节后只需保证各动作能够依次完成即可。

1.2 自动调压系统组成

10 kV 自动调压系统主要由 STM32F103ZET6 型单片机(下文简称单片机)、按键显示模块、监测采集电路、驱动电路和固态继电器模块等构成。其中,单片机主要承担数据处理、记录调压信息、发送

升降压命令等任务,单片机控制系统如附录 A 中的图 A1 所示;按键显示模块承担调整二次侧电压稳压范围的上下限、显示电压和电流信息、调整系统相邻动作过程的时间间隔、调整系统控制方式的任务;监测采集电路包括 ADC 采集电路、放大电路、滤波电路,其功能为监测二次侧电压,并将其转换为 0~3 V 电压滤波后传输至单片机系统;驱动电路根据单片机发出的升降压命令控制 SSR 的开通与关断。

通信接口是调压系统中预留的接口,通过它可以进一步实现远程调度控制、多台电力电子自动调压装置的联合调压以及配合无功补偿装置的投切。

1.3 启动保护支路控制原理

图 1 中 R_q 与 K_A 组成的支路连接在 3 档分接头与中性点之间, K_A 的主触点为常闭节点,配电变压器合闸前 K_A 为闭合状态。变压器合闸后单片机系统检测到变压器二次侧电压大于设定的启动电压阈值时,调压系统将控制启动保护支路退出。当出现电压缺相或者严重的三相不平衡现象时,调压系统将控制启动保护支路投入运行,SSR 全部退出。

在变压器合闸前中 K_A 为闭合状态,避免 SSR 承受启动冲击电压^[17]。变压器空载或轻载产生的励磁涌流是变压器额定电流的数倍,启动支路中串入电阻可减小启动励磁涌流^[18],也避免了选用大电流电力电子器件。在某些不利因素导致电力电子器件损坏或者单片机系统损坏等情况下,该支路可立即自动投入运行,避免停电事故损失。

2 高压绕组连接方式影响机理研究

2.1 星形连接

配电网中变压器高压侧为星形接线的中性点调压方式和高压侧为三角形接线的中部调压方式应用较为普遍。当高压绕组接线方式不同时,电力电子开关两端承受的电压 U_w 和分接头对地电压 U_d 不同。 U_w 和 U_d 的测量方式见附录 A 中的图 A2。电力电子器件两端承受的电压决定选用的电力电子器件的工作电压和漏电流大小,漏电流过大甚至超过高压侧额定电流时会影响变压器的正常功能。分接头对地电压则会影响电力电子开关控制电路的设计,当分接头对地电压过高时,需要在控制系统与电力电子开关器件之间加入电压隔离模块,否则可能

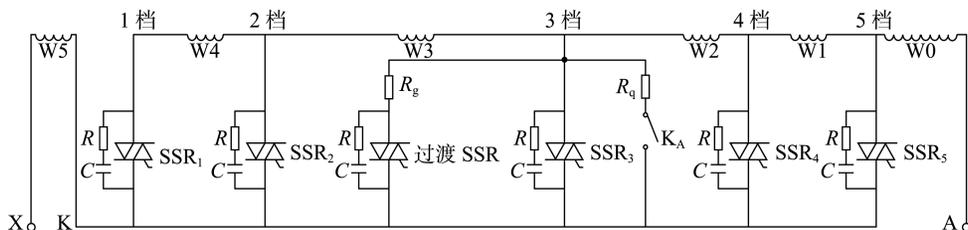


图 1 自动调压系统主接线

Fig.1 Main wiring of automatic voltage regulating system

导致控制系统在工作过程中直接被击穿烧坏。现以 10 kV 配电变压器 A 相为例进行理论计算说明, 实验变压器参数见附录 B 中的表 B1。

当变压器处于不同的工作档位时, U_w 和 U_d 计算公式如下:

$$U_w = |n_1 - n| \eta (U_A - U_{im}) \quad (2)$$

$$U_d = |n_1 - n| \eta (U_A - U_{im}) + \Delta U + U_{im} \quad (3)$$

其中, U_A 为高压侧 A 相电压; n_1 为需要计算电压的档位; n 为当前工作档位; η 为相邻分接头之间的调压范围; U_{im} 为中性点电压, $U_{im} = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}$; ΔU 为

W5 绕组上的电压降落, 其方向与 U_A 的方向一致, 有效值为 288.7 V。当变压器在理想状态下进行对称运行, 即 $U_{im} = 0$ 时, U_w 和 U_d 的计算方式可由式 (2)、(3) 分别化简为式 (4)、(5) 所示形式。

$$U_w = |n_1 - n| \eta U_A \quad (4)$$

$$U_d = U_w + \Delta U \quad (5)$$

由式 (2)、(4) 可知, 当电网电压出现三相不平衡, 即 $U_{im} \neq 0$ 时, 会出现以下情况:

a. 当 $|U_A - U_{im}| < |U_A|$ 时, 电力电子开关两端承受的电压小于对称运行时承受的电压;

b. 当 $|U_A - U_{im}| > |U_A|$ 时, 电力电子开关两端承受的电压大于对称运行时承受的电压。

通过式 (3) 可变形得到:

$$U_d = |n_1 - n| \eta U_A + (1 - |n_1 - n| \eta) U_{im} + \Delta U \quad (6)$$

由式 (5)、(6) 可知, 当 $U_{im} \neq 0$ 时, 式 (6) 中等号右边的第 2 项同样可能导致分接头对地电压大于对称运行时的分接头对地电压。由上述分析可知, 变压器的不对称运行可能导致电力电子开关的运行环境更加恶劣。

本例中 $\eta = 2.5\%$, 星形连接方式分接头之间的级电压为 144.3 V。星形连接方式中, W0 绕组匝数为 587 匝, W1、W3、W4 绕组匝数均为 16 匝, W2 绕组匝数为 15 匝, W5 绕组匝数为 32 匝, 二次侧绕组匝数为 26 匝。由式 (4)、(6) 可计算出变压器在理想运行状态下电压 U_w 的最大有效值为 577.4 V, 对应的瞬时峰值为 816.6 V, U_d 的最大有效值为 866.1 V, 对应的瞬时峰值为 1 224.9 V。考虑到一般情况下, 变压器运行时的不平衡程度不大, 对所计算的 SSR 在参数上留一些余量, 故实验最终选择的 SSR 的工作电压峰值为 1 600 V, 隔离电压峰值为 2 500 V, 该类器件在高压侧为星形接法时能够稳定地工作。

2.2 三角形连接

当变压器高压侧为三角形连接, 调压方式为中部调压时, 同样以 AB 绕组为例, SSR 两端承受的电压 U_w 的计算公式如下:

$$U_w = |n_1 - n| \eta (U_A - U_B) \quad (7)$$

其中, U_A 和 U_B 为相电压。当变压器在理想状态下进行对称运行时, 以 A 相电压作为参考, U_w 的计算公式如式 (8) 所示。

$$U_w = \sqrt{3} |n_1 - n| \eta U_A \angle \frac{\pi}{3} \quad (8)$$

当电网电压出现三相不平衡时, 由式 (7)、(8) 可知:

a. 当 $|U_A - U_B| < \sqrt{3} |U_A|$ 时, 电力电子开关两端承受的电压小于对称运行时承受的电压;

b. 当 $|U_A - U_B| > \sqrt{3} |U_A|$ 时, 电力电子开关两端承受的电压大于对称运行时承受的电压。

根据式 (8) 可得到 U_w 的最大有效值为 1 000 V, 对应的瞬时峰值为 1 414.3 V。

以 AB 绕组 B 相电压输入端部为基准, 其线圈对地电压示意图见图 2, 则绕组上任意一匝线圈的对地电压 U_q 的计算式为:

$$U_q = \frac{q}{p} (U_A - U_B) + U_B = \frac{qU_A + (p-q)U_B}{p} \quad (9)$$

其中, p 为线圈总匝数; q 为绕组某一位置与绕组端部之间的线圈匝数。

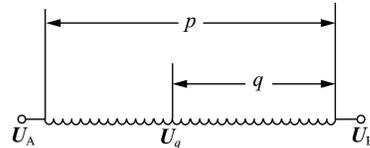


图 2 高压线圈对地电压计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of calculation for voltage between high-voltage coil and ground

根据式 (9) 以 U_A 作为参考电压, 保持 U_A 、 U_B 的幅值不变, 改变 AB 两相电压的夹角, 可得到电压 U_q 的变化情况如图 3 所示。保持电压 U_A 的幅值和相电压夹角不变, 改变电压 U_B , 可得到电压 U_q 的变化情况如图 4 所示。

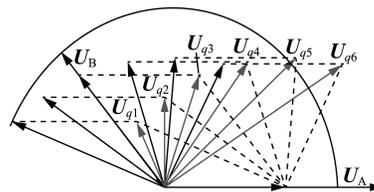


图 3 绕组对地电压随相电压夹角变化示意图

Fig.3 Voltage from winding to ground varying with angle

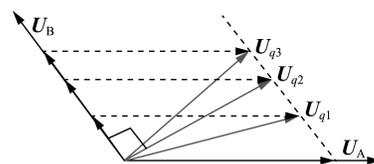


图 4 绕组对地电压随相电压幅值变化示意图

Fig.4 Voltage from winding to ground varying with voltage amplitude

由图 3 可知,当 AB 两相电压幅值保持不变时,电压 U_q 随着相电压夹角的增大而减小。由图 4 可知,当 A 相电压幅值保持不变,在电压 U_B 增大的过程中,电压 U_q 先随着相电压 U_B 的增大而减小,直至电压 U_q 与相电压 U_B 之间的夹角为 90° 时,电压 U_q 达到最小值,然后 U_q 随着相电压 U_B 的增大而增大。由此可知,变压器的三相不平衡运行可能使分接头对地电压增大,导致电力电子器件工况更加恶劣。

以 A 相电压作为参考相量,当变压器处于理想状态下进行对称运行时,有 $U_B = U_A \angle -120^\circ$, 即 $U_B = -\frac{1}{2}U_A - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_A$, 因此可对式(9)进行变形,得到其复数如式(10)所示。

$$U_q = \frac{qU_A + (p-q)U_B}{p} = \frac{3q-p}{2p}U_A - j\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{q-p}{p}U_A \quad (10)$$

将式(10)进行平方再开根号可得:

$$U_q = \sqrt{\left(\frac{3q-p}{2p}\right)^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{q-p}{p}\right)^2} U_A = \sqrt{\frac{3q^2+p^2-3pq}{p^2}} U_A = \sqrt{\left[\sqrt{3}\left(\frac{q}{p}-\frac{1}{2}\right)\right]^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} U_A \quad (11)$$

记 $U_3 = \sqrt{3}\left|\frac{q}{p}-\frac{1}{2}\right|U_A$ 、 $U_4 = \frac{U_A}{2}$, 则 $U_q = \sqrt{U_3^2 + U_4^2}$,

其中, U_3 为绕组某一位置与绕组电压最低点之间电压降落; U_4 为绕组电压最低点对地电压。由此可得到分接头处对地电压如图 5 所示。

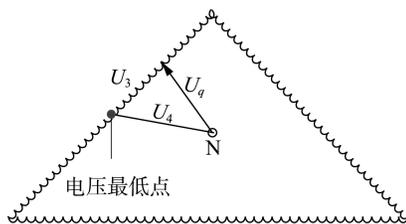


图 5 分接头处对地电压示意图

Fig.5 Schematic diagram of voltage between tap and ground

图 5 中, N 为电压零点; U_4 为变压器高压绕组上的电压最低点电压理论计算值。由图 5 可得到分接头对地电压 U_d 的计算公式为:

$$U_d = \sqrt{U_3^2 + U_4^2} \quad (12)$$

其中, $U_4 = 2886.8$ V。由式(12)可知分接头与电压最低点之间的绕组数越多,绕组之间的电压降落 U_3 越大,分接头对地电压 U_d 越大。最大的分接头对地电压对应变压器工作在 5 档时,1 档的分接头对地电压,其理论计算值 $U_d = 3055.1$ V、 $U_3 = 1000$ V。

本文按照三角形接法,设计了以下模拟仿真实验:高压侧线电压设置为 10 kV,三相变压器由 3 台

单相多绕组变压器以三角形连接方式形成,其参数见附录 A 中的表 A1。分接头对地电压测点编号如图 6 所示。图中,绕组 W0、W5 的匝数比为 42.5%,绕组 W1、W2、W3、W4 的匝数比为 2.5%;变压器三相对称运行时电压最低点在变压器档位切换完成后所有接入绕组的中间位置,图 6 中的电压最低点为变压器工作在 2 档时的电压最低点。仿真结果见附录 A 中的表 A2。

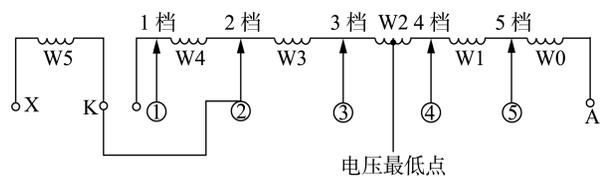


图 6 分接头处对地电压测点分布图

Fig.6 Measurement point distribution of tap to ground voltage

由理论计算以及仿真实验结果可知,当变压器高压侧为三角形接法时,SSR 两端承受的电压有效值为 1 000 V,峰值为 1 414.3 V,其峰值非常接近 SSR 的工作电压峰值 1 600 V,SSR 的漏电流对变压器的影响不能忽略。分接头对地电压的最低值为 2 886.7 V,峰值为 4 082.4 V,远高于隔离电压峰值 2 500 V。控制系统与 SSR 之间若不存在设置良好的隔离措施,将导致控制系统被烧毁。

由星三角接线分析可知,变压器在不对称方式下运行可能会导致电力电子开关器件的工作环境更加恶劣。电力电子开关在星形接线方式下所需承受的电压以及分接头对地电压均低于三角形接线方式。所以采用高压侧为星形接法的中性点调压方式作为配电变压器的接线方式有利于降低调压装置可靠性,降低成本。

3 调压系统的仿真实验

本文采用 MATLAB 的电力系统仿真元件库建立了 5 档、无弧单相配电变压器自动调压模型。按照表 A1 的参数计算得到配电变压器一次侧等效电阻 $R = 2.6914 \Omega$ 、等效电抗 $X = 9.6 \Omega$ 、磁化电阻 $R_m = 7.7300 \text{ k}\Omega$ 、磁化电感 $L_m = 398.1696 \text{ H}$ 。一次侧绕组总匝数为 682 匝,二次侧绕组总匝数为 26 匝。配电变压器选用元件库中的多绕组变压器,绕组 W0 的匝数为 587 匝,绕组 W1、W3、W4 的匝数为 16 匝,绕组 W2 的匝数 15 匝,绕组 W5 的匝数 32 匝,过渡电阻 $R_g = 50 \Omega$,由于仿真不需要启动合闸保护,故在仿真实验中去掉启动保护支路。SSR 采用反并联晶闸管代替,仿真电路如附录 A 中的图 A3 所示。

实验中高压侧输入电压 10.5 kV,通过时序模块模拟实际电路中触发过程,模拟由 3 档切换至最高档,再由最高档切换至最低档,最后由最低档切换至 3 档的连续切换过程。档位切换只能在相邻分接头

之间切换,此切换方式与实际动作过程一致。变压器工作在 1—5 档位时变压器二次侧输出电压有效值分别为 218.5、224.2、229.8、235.0、240.4 V,过渡电流变化情况见图 7,仿真触发时序见附录图 A 中的图 A4,二次侧电压变化情况见附录 A 中的图 A5。

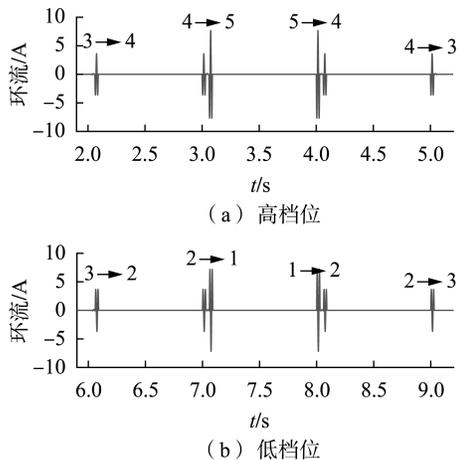


图 7 过渡环流曲线图

Fig.7 Curve of transition branch circulation

仿真实验验证了本文所提电力电子调压方案的可行性,单次调压平均可提升或降低 5.5 V。由图 7 可知,过渡环流限制在变压器额定电流的范围之内,不会影响变压器的正常运行,调档过程时间为 4.5 个工频周期。当过渡支路与 3 档支路形成闭合回路时,3 档与过渡支路之间不存在绕组,回路中没有过渡电流。

4 现场试验研究

10 kV 配电变压器的自动调压试验在江苏宏源变压器厂试验中心进行。实验所用油浸式配电变压器参数见表 A1,SSR 型号为 PQSSR-M,开断时间为 0.5 个工频周期,它具有电压过零导通电流过零关断的功能。现场试验均为空载试验,主要为研究星三角接线方式对调压系统存在的影响和调压系统的正常调压情况。

a. 星三角试验。试验变压器首先按照三角形接线设计制造,三角形试验完成后由变压厂重新改造成星形接线方式。星三角试验测试电压范围为 4 000~10 500 V,测试步长为 500 V。试验结果表明在三角形接线方式下,高压侧电压达到 9 500 V 前,调压系统能够安全工作,系统可以进行正常的换挡操作;将变压器调至 3 档,电压升高至 10 000 V 时,变压器绕组上的电压达到峰值左右 SSR 会被短时击穿,检测击穿电流峰值为 16.028 A,电流曲线见图 8。试验中能够明显听到电流吱吱的响声,试验 2 min 左右,SSR 被彻底击穿,检测发现过渡支路以及 3 档的 SSR 被击穿。当变压器为星形接线方式时,试验中未检测到击穿电流。调压系统能够安全的工作在

任意档位。

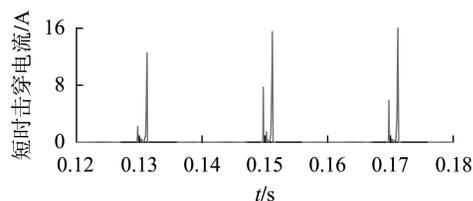


图 8 短时击穿电流图

Fig.8 Short-time breakdown current chart

b. 调压试验。调压实验主要检测调压系统的可靠性以及调节效果。升压档位调节实验结果见表 1,降压档位调节实验结果见附录中的表 A3。结果表明:单次调节变压器档位可调节二次侧电压 5.33 V,调节过渡过程中二次侧电压没有直流分量,奇次谐波含量较高,偶次谐波含量较低,其中 7 次谐波含量最高,达到 0.81% 左右,3 次与 5 次谐波含量次之。单次提高变压器档位平均可提升二次侧电压 5.32 V,平均谐波总含量为 2.46%,单次降低变压器档位平均可降低二次侧电压 5.34 V,平均谐波总含量为 2.43%。

表 1 升压实验二次侧电压分析数据

Table 1 Analysis data of secondary voltage in Boost experiment

升档	提升电压/V	谐波含量/%			总谐波含量/%
		3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	
1 → 2	5.19	0.32	0.81	0.37	2.47
2 → 3	5.50	0.33	0.77	0.38	2.65
3 → 4	5.32	0.30	0.84	0.38	2.56
4 → 5	5.28	0.31	0.85	0.35	2.15

5 结论

本文在考虑高压侧接线方式的影响下设计了 5 档、无弧、快速、平稳的电力电子自动调压装置。根据调压系统的理论及实验分析可得到以下结论。

a. 无论变压器高压侧采用哪种接线方式,变压器的不对称运行方式都有可能导导致电力电子开关的工作环境更加恶劣。

b. 在现场条件允许的情况下,配电变压器可使用星形接法的中性点调压方式。星形接法可显著降低电力电子开关两端的承受电压以及分接头对地电压,避免盲目选择大功率电力电子器件,因此可降低电力电子器件的成本,提高装置可靠性。

c. 调压装置能够根据变压器二次侧电压变化实现自检测、自调节的功能,调节过程中不会出现电压中断的现象。该调压系统于 2017 年 6 月在 110 kV 汤山变 10 kV 锦达线南京峰之泉宾馆正式挂网运行,运行中尚未出现异常状况,验证了该电力电子自动调压方案的可行性与可靠性。

本文对于 10 kV 电力电子开关相关电压的计算同样适用于其他高电压等级电网,适当的优化计算

不仅能保证配网设备的安全可靠运行,还能适当降低控制系统的经济成本。值得注意的是,该装置在投入实际应用时加入高低压电气隔离措施才更加可靠。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 孙文生,张明军. 五区图变电站电压无功控制原理研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(12):39-41.
SUN Wensheng, ZHANG Mingjun. Study on five-zone theory of substation VQC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12):39-41.
- [3] ECHAVARRIA R, CLAUDIO A, COTOROGEA M. Analysis, design and implementation of a fast on-load tap changing regulator[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(3):527-534.
- [4] LI Xiaoming, HUANG Junjie. Research of fast and non-impact on-load tap changing regulator for electrolytic progress[C]//Proceedings of the Eleventh International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China; ICEMS, 2008:4470-4474.
- [5] 黄俊杰,李晓明. 电力电子有载调压装置的控制系统设计[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):54-57.
HUANG Junjie, LI Xiaoming. Design of automatic system for power electronics OLTC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(7):54-57.
- [6] 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.
- [7] 赵玉林,牛泽晗,李海凤,等. 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[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):169-175.
ZHAO Yulin, NIU Zehan, LI Haifeng, et al. Contactless OLTC with protective function for power distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9):169-175.
- [8] 骆平,刘清澄. 无弧切换的有载调压变压器[J]. 中国电力,2003,36(Z1):21-23.
LUO Ping, LIU Qingcheng. A new type of on-load tap changer without arcing[J]. Electric Power, 2003, 36(Z1):21-23.
- [9] 钱照明,张明军,盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5149-5161.
QIAN Zhaoming, ZHANG Mingjun, SHEN Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5149-5161.
- [10] FT1500 AU-120. Mitsubishi general use thyristor[R]. Tokyo, Japan: Mitsubishi Electric Datasheet, 1999.
- [11] FT2871N80TOH, Phase Control Thyristor[R]. Neubiberg, Germany: EUPEC Datasheet, 2002.
- [12] 李晓明,皮伟才,娄颖,等. 有载调压中互斥晶闸管开关组的通断控制[J]. 高电压技术,2006,32(1):65-68.
LI Xiaoming, PI Weicai, LOU Ying, et al. Method of switching mutual repulsive thyristors switch in the tap changing progress of on-load transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):65-68.
- [13] 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.
- [14] 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,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.
- [15] 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.
- [16] 朱国荣,李民族. 配电变压器的晶闸管串联调压方法[J]. 变压器,2002,39(7):22-27.
ZHU Gourong, LI Minzu. Means of distribution transformer changing voltage of series connection thyatron transistor[J]. Transformer, 2002, 39(7):22-27.
- [17] 付岩. 无触点有载自动调压配电变压器关键技术的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2011.
FU Yan. Research on technology of data acquisition in on-load automatic voltage regulating distribution transformer[D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2011.
- [18] 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.

作者简介:



宋开胜

宋开胜(1992—),男,湖北咸宁人,硕士研究生,通信作者,主要从事配电变压器自动调压以及电力设备状态监测与故障诊断方面的研究工作(**E-mail**:sks_8866@163.com);

王华芳(1979—),女,辽宁阜新新人,高级工程师,主要研究方向为配电运检(**E-mail**:4885728@qq.com);

马宏忠(1962—),男,江苏南通人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力设备状态监测与故障断、磁悬浮承重技术、电力系统谐波分析的研究工作(**E-mail**:hhumhz@163.com)。

(下转第62页 continued on page 62)

Asynchronous fault location of transmission system based on wide area amplitude ratio information of frequency components in traveling wave fronts

PENG Nan^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, LIANG Rui^{1,2}, YANG Zhi^{1,2}

(1. School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Jiangsu Province Laboratory of Electrical and Automation Engineering for Coal Mining, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Most of the existing fault location methods of traveling wave in power network mainly rely on the arrival time and wave velocity, which require accurate synchronization. A fault location method for transmission system based on the amplitude ratio information of frequency components in the aerial-mode voltage initial traveling wave front is proposed. Based on the attenuation characteristics of frequency component amplitude in the initial traveling wave front and the shortest propagation paths of traveling wave, a fault line detection criteria based on the difference between the actual and theoretical amplitude ratio of frequency components is constructed by using the virtual fault point method. Under the premise of ensuring the training universality and fewer training samples, the nonlinear relationship between the amplitude ratio of two different frequency components in the traveling wave front and the actual fault location is fitted by using RBF (Radial Basis Function) neural network, which can realize accurate fault location. The proposed method only relies on the amplitude ratio information of lower frequency component and does not need to arrange measuring points in the whole system and synchronize accurately. The simulation model of IEEE 30-bus system is set up in PSCAD/EMTDC, and the simulative results verify the high accuracy and reliability of the proposed method.

Key words: aerial-mode traveling wave; amplitude ratio; asynchronous measurement; fault location; transmission system; RBF neural network

(上接第 35 页 continued from page 35)

Research and experimental analysis on automatic voltage regulation of 10 kV distribution transformer

SONG Kaisheng¹, WANG Huafang², MA Hongzhong¹, XU Honghua², LIU Baowen¹,
WU Shuyu¹, GU Shuwen¹, YANG Qingfu³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;
3. Jiangsu Hongyuan Electric Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Aiming at the problems of complicated mechanical on-load voltage regulator device and inconvenient voltage regulation of distribution transformer, a five-speed automatic voltage regulation scheme based on power electronic switch is proposed. The start-protection circuit is used to prevent the power electronic switch from being subjected to impulse voltage and magnetizing inrush current and ensure the normal work for distribution transformer when the power electronic switch exits. Considering different wiring modes of the primary side of transformer, the distribution of voltage between two sides of switching devices and voltage between tap and ground are analyzed to provide a reference for parameter selection of power electronic switching devices. The results show that the neutral point voltage regulation mode with star connection on primary side is more conducive to the operation of power electronic devices, and the middle voltage regulation mode with delta connection on primary side has higher requirements on working voltage and isolation voltage of power electronic devices. On the basis of circuit design and device selection, an automatic on-load tap-changer based on power electronic switch is developed and installed in the field trial operation. Theoretical research, simulation analysis, prototype test and online trial operation show the feasibility and reliability of the proposed scheme.

Key words: distribution transformer; power electronic switch; automatic voltage regulation; star connection and delta connection; start-protection

附录

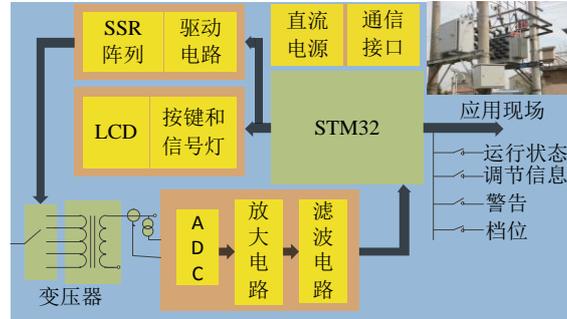


图 A1 单片机控制系统
Fig.A1 Control system of SCM

表 A1 试验变压器技术参数
TableA1 Technical parameters of test transformer

型号	额定容量 /kV · A	额定电压/kV		损耗/W		空载电流/%	短路阻抗/%
		一次侧	二次侧	空载	负载		
SZ13-M-400/10	400	10±2×2.5%	0.4	357.5	4306.3	0.17	3.84

表 A2 各分接头对地电压 U_2 有效值分布数据
Table A2 Each tap to the ground voltage U_2 RMS distribution data

测点	1	2	3	4	5	电压最低点
1 档	2934.2	2898.6	2886.7	2898.6	2934.2	2886.7
2 档	2964.7	2915.0	2889.8	2889.8	2915.0	2886.7
3 档	3004.5	2939.6	2990.0	2886.7	2900.0	2886.7
4 档	3054.9	2973.7	2918.2	2890.2	2890.2	2886.7
5 档	3117.1	3018.4	2945.9	2901.6	2886.7	2886.7

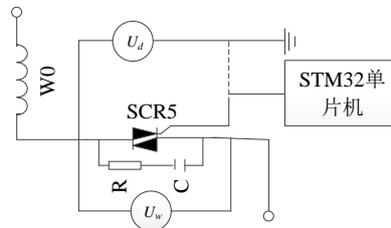


图 A2 SSR 电压实验接线
Fig.A2 Wiring of voltage experiment for SSR

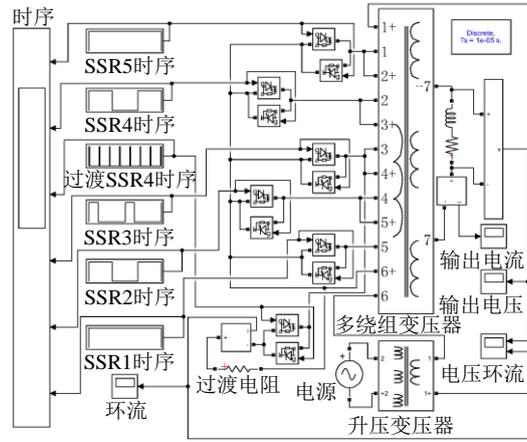


图 A3 变压器自动调压仿真图

Fig.A3 Transformer automatic voltage regulator simulation diagram

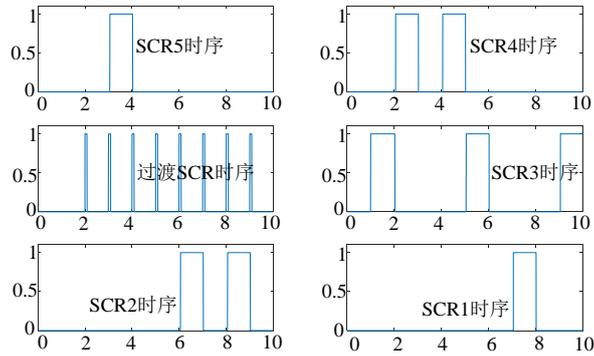


图 A4 仿真触发时序波形

Fig.A4 Simulation touch timing chart

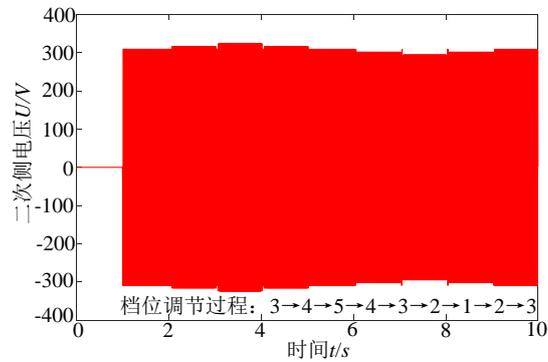


图 A5 仿真实验二次侧电压波形

Fig.A5 Simulation experiment secondary voltage waveform

表 A3 降压实验二次侧电压分析数据

Table A3 Buck experiment secondary voltage analysis data

降档	5→4	4→3	3→2	2→1
降低电压/V	5.32	5.24	5.66	5.17
三次谐波	0.26%	0.27%	0.26%	0.17%
五次谐波	0.86%	0.80%	0.81%	0.69%
七次谐波	0.42%	0.49%	0.41%	0.30%
谐波总含量	2.64%	2.82%	2.53%	1.74%