

DOI: 10.7667/PSPC180394

基于晶闸管的分段式快速调压模型的设计

宋开胜¹, 马宏忠², 王华芳³, 徐唐煌¹, 顾苏雯²

(1. 国网湖北省电力有限公司咸宁供电公司, 湖北 咸宁 437100; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008)

摘要: 针对机械式有载调压和电力电子式自动调压装置结构复杂、切换过程冗长和响应速度慢等问题, 提出基于晶闸管的分段式快速调压模型。该模型去除冗余的过渡电路, 精简调压结构; 在保证无短暂的电压电流中断的情况下, 配合高频全控型双向晶闸管的特性, 采用快速切换和增加分段绕组的方式限制过渡环流, 简化调压流程; 实现在任意时刻进行切换, 突破过零切换理论的限制。以理论推导确定环路电流的影响因素, 根据仿真实验以及结果分析得出合理的影响参数值。通过 Matlab 对 10 kV/0.4 kV、400 kVA 的变压器进行了最终参数的仿真, 实验证明了分段式模型的可行性、可靠性以及快速性。

关键词: 分段式模型; 配电变压器; 调压绕组; 自动控制

Design of a segmented rapid voltage regulation model based on thyristors

SONG Kaisheng¹, MA Hongzhong², WANG Huafang³, XU Tanghuang¹, GU Suwen²

(1. Xianning Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Xianning 437100, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Nanjing Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: Aiming at solving the problems of the existing mechanical on-load voltage regulation and power electronic automatic voltage regulators with complicated structure, lengthy switching process and slow response speed, a segmented fast voltage regulation model based on thyristors is proposed. The model removes redundant transitional circuits to reduce voltage regulation structure. Under the condition of ensuring that there is no short-term voltage and current interruption, it cooperates with the characteristics of high-frequency full-control thyristors, and uses fast switching thyristors and segmented windings to restrict the transitional circulation and simplify the regulation. The process can be switched at any time, which breaks the limit of zero-crossing switching theory. The influencing factors of the loop current are determined through the theoretical inference, and reasonable values of the influencing parameter are obtained based on the simulation experiment and the result analysis. The final parameters are used in the 10 kV/0.4 kV and 400 kVA transformer to be simulated by Matlab. The experiment has proved the feasibility, reliability and rapidity of the segmented model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577050) and Science and Technology Project of Jiangsu Electric Power Company (No. J2017069).

Key words: segmented model; distribution transformer; regulator winding; automatic control

0 引言

配电网末端电压越限是较为普遍的现象^[1-2], 人民日益增长的生活质量需求也对电压质量提出了更高的要求。配网电压不合格^[3]的治理是电网人员日

常工作的重点之一, 目前较为合理的措施是通知用户内部整改、投切电容器组、应用无励磁调压、机械式有载调压变压器或者投入电力电子自动调压变压器^[4-7]。城市郊区和农村配网存在大量单相负荷, 继而导致严重的三相电压电流不平衡, 而且城郊与农网等地区时常发生乱接与错接的现象, 因此用户整改的方式并不会发挥“药到病除”的根治效果。另一方面, 在无功充足的情况下投切电容器会造成

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577050); 江苏省电力公司科技项目资助(J2017069)

无功过剩甚至是浪费的结果。

变压器调压是电力系统电压控制的一项主要措施^[8]。其中在用户投诉率和平均停电时间等参数的考评指标下与电网智能化、自动化的发展浪潮下，无励磁调压将逐渐成为过渡型的切换方式。经济发达国家的有载分接开关的配备率远高于我国，德国 6.6 kV 以上的变压器装设有载调压的覆盖率达到 90% 以上^[9]。机械式分接开关响应速度慢、装置结构复杂、体型巨大，而且随着时间的推移，电弧会导致一系列的机械故障^[10-13]。电力电子式自动调压变压器则更具优势，也是科研学者们探索研究的重要稳压方法。

随着电力电子的发展，晶闸管等典型开关元件可作为自动调压的关键切换器件。文献[14]结合相关的经验基础，总结了适用于高压和低压等级的无弧切换方案，展望了电力电子式自动调压的前景。文献[15-16]利用 J-A 理论和传输线模型推导出调压器切换过渡过程以及过零切换过程中电压电流的变化情况，建立了“臂-桥”结构模型，但切换支路仍包含过渡电阻电路，切换过程冗余、不够灵活。文献[17-19]引入光纤触发控制与保护方式，简化了过渡支路，但并未对晶闸管触发的时刻给出论述。因此，本文针对电力电子式自动调压系统的不足，突破已有的设计思维限制，移除了高压绕组中的过渡电路，改进了互斥晶闸管^[20]的触发方式，设计了分段式快速调压模型，并结合相关的设计参数进行了仿真实验，证明了分段式快速调压模型的可靠性与可行性。

1 分段式快速调压系统的设计

1.1 分段式快速调压模型的介绍

现有的电力电子自动调压模型一般按照机械式有载分接开关结构改造而来，虽然改善了传统模型存在的电弧现象，但为了减小过渡过程中绕组形成环路时的短路电流，电力电子调压模型中依然保留有过渡电阻支路，其调压模型的绕组连接方式如图 1 所示。过渡电阻在调压过程会产生较大的损耗中，其产生的热量损耗 Q 计算式如式(1)所示。

$$Q = Pt = R \int_0^{T_c} i_c^2(t) dt \quad (1)$$

式中： i_c 为环路电流； T_c 为环路电流存在的时间； R 为过渡电阻。由式(1)可知，过渡电阻越大，调压产生的变压器损耗的也越大，过渡时间越长，相应产生的热量也相应越高，并且过渡电阻会导致切换过程中变压器输出电压质量严重下降，降低变压器效率，其调节过程也显得复杂繁琐。

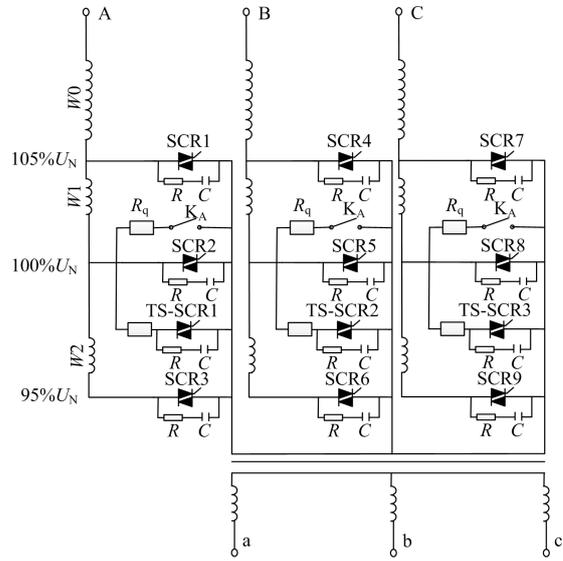


图 1 典型的电力电子的调压模型

Fig. 1 Typical voltage regulation model based on power electronics devices

为提高调压装置的响应速度，减小过渡电流和变压器调压过程的损耗，本文将变压器内部线圈改进为分段式设计，其改进模型见图 2，图中的模型为三相调压模型中的某一相。模型中去掉了过渡支路，并设计成五档的电力电子式调压模型。分段式模型中各段绕组按照图 2 所示的方式重新连接，连接时保持各段绕组的同名端方向相同，其等效电路模型见图 3。

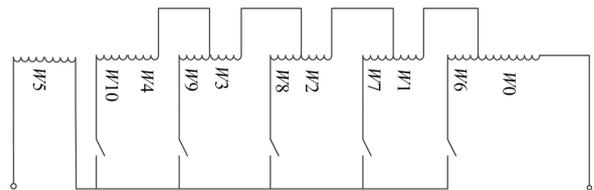


图 2 线圈分段式模型图

Fig. 2 Segmented model diagram of winding

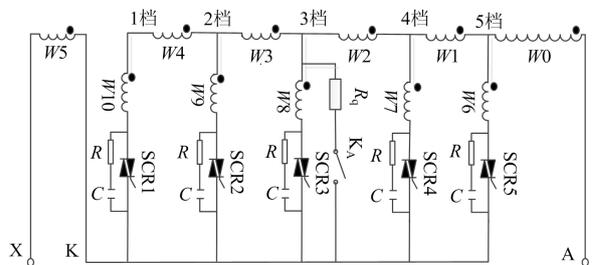


图 3 分段式模型等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of segmented model

电力电子开关选用可快速开断的双向全控型晶闸管，方便于在任意时刻控制晶闸管的开断。图 3

中 $W5$ 绕组为变压器厂家为平衡变压器高压侧电压而特意设置的一段绕组, 其匝数比可调整, 做实际计算仿真时可忽略不计。 $W6$ — $W10$ 的绕组设置为相等的匝数, 即匝数关系为 $W6 = W7 = W8 = W9 = W10$, 匝数相等的优势将在 2.1 节中论述, 故此不再赘述。

1.2 分段式模型调压原理

分段式快速调压模型的基本调节方式为改变变压器一侧绕组的匝数。根据式(2)可知, 当图 3 中晶闸管 SCR5 导通时, 一次侧绕组匝数最小, 此时变压器工作在 5 档, 二次侧输出电压最高; 同理 SCR1 导通时, 变压器工作在 1 档, 二次侧输出电压最低。相邻分接头所连接的晶闸管即为互斥晶闸管, 通过互斥关系对分接开关进行调档操作。

$$\frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2} \quad (2)$$

分段式快速调压原理为: 系统初始化数据后并进行启动监测后控制 R_q 与 K_A 组成的启动电路合闸, 此时电流互感器和电压互感器采集变压器二次侧输出的电流和电压信息, 控制核心将其处理后转换为电压和电流的实际值, 最后调压系统根据所设定的电压范围上下限进行调整, 其电压稳定范围为 $U_{2min} \leq U_2 \leq U_{2max}$, 当系统电压 $U_2 > U_{2max}$ 时, 系统由高档位向低档位调节; 当系统电压 $U_2 < U_{2min}$ 时, 系统由高档位向低档位调节; 当系统电压不在稳定范围之内并且档位无法调节时, 调压系统会及时通知工作人员。单次档位调节限制在相邻分接头之间的变换, 防止发生过调节的现象, 其调档原理如图 4 所示。图 4 中左边虚线框表示互斥晶闸管的升高档位调节操作, 右边则表示降低档位调节操作。

2 分段式快速调压模型相关计算

2.1 环路电流计算

为保证变压器二次侧的实时在线供电, 故分段式快速调压模型在切换过程中也会存在短暂的短路回路, 其等效电路如图 5 所示, 该回路中的三段绕组均可等效为电压源 U_W 、电阻 R_W 和电抗 X_W , 最终可等效为如图 5 右图所示的电路图, 其等效关系如式(3)所示。由 $W6 = W7 = W8 = W9 = W10$ 可知 $U_{W6} = U_{W7} = U_{W8} = U_{W9} = U_{W10}$, 所以 $U_\Sigma = U_{W(i)}$, 新增绕组在回路中产生的电压幅值相等, 方向相反, 即他们在短路回路上产生的电压相互抵消, 所以该模型可在增加短路回路中的电抗的情况下而不增加短路回路中的等效电压, 从而达到减小环路电流的效果。

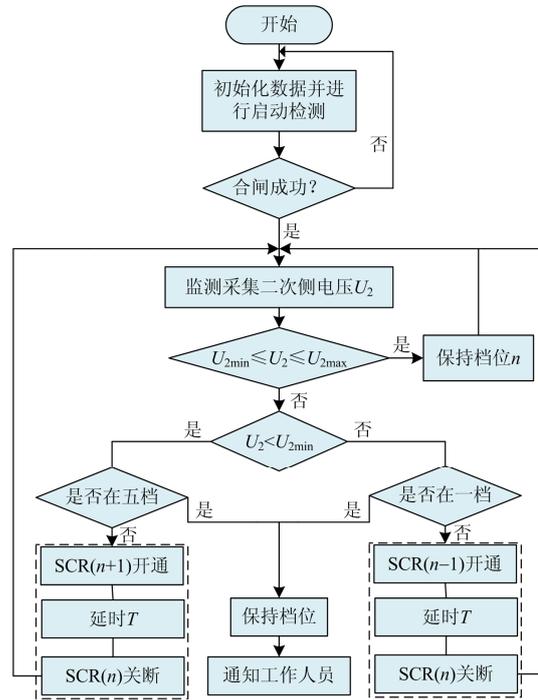


图 4 分段式模型调压原理

Fig. 4 Voltage regulating principle of segmented model

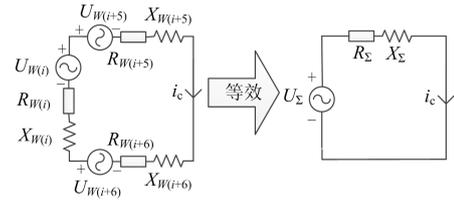


图 5 环流计算等效原理图

Fig. 5 Equivalent principle diagram of circulatory calculation

$$\begin{cases} U_\Sigma = U_{W(i)} - U_{W(i+5)} + U_{W(i+6)} \\ R_\Sigma = R_{W(i)} + R_{W(i+5)} + R_{W(i+6)} \\ X_\Sigma = X_{W(i)} + X_{W(i+5)} + X_{W(i+6)} \end{cases} \quad (3)$$

根据图 5 所示的等效原理图可得到环流 i_c 计算式(4), 对该式进行拉普拉斯变换可求出环流 $i_c(s)$, 再进行拉普拉斯反变换可得到环流的瞬时值表达式(5), 为环路零状态下环流 i_c 的稳态分量, 为环路零状态下环流 i_c 的暂态分量, 为环路零输入状态下各线圈所储存的能量转换成的电流之和。

$$L_\Sigma \frac{di_c}{dt} + i_c R_\Sigma = u_\Sigma \quad (4)$$

$$i_c = i' - i'' + i''' \quad (5)$$

$$i' = \frac{\sqrt{2}U_\Sigma}{\sqrt{X_\Sigma^2 + R_\Sigma^2}} \cos(\omega t + \varphi_{u_0} - \tan^{-1} \frac{X_\Sigma}{R_\Sigma}) \quad (6)$$

$$i'' = \frac{\sqrt{2}U_{\Sigma}}{\sqrt{X_{\Sigma}^2 + R_{\Sigma}^2}} \cos(\varphi_{u_0} - \tan^{-1} \frac{X_{\Sigma}}{R_{\Sigma}}) e^{-\frac{R_{\Sigma} t}{L_{\Sigma}}} \quad (7)$$

$$i''' = c_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + c_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + c_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (8)$$

式中： c_1 、 c_2 和 c_3 为形成环路前的时刻各段线圈的初始电流； τ_1 、 τ_2 和 τ_3 为环路中各段线圈对应的时间常数，且 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = L_{\Sigma} / R_{\Sigma}$ 。由式(5)可知环路电流大小的影响因素包括调压过程的初始电压电流、环路存在的总时间和绕组的等效阻抗等因素，其中电压电流的初始条件不同反映在同一周期不同时刻进行切换操作，绕组等效阻抗的大小则集中体现在分段电路中绕组的匝数的不同。

2.2 理论切换次数的计算

分段式快速调压模型可在任意时刻进行分接头的切换，切换过程只需保证变压器不会出现电压中断或者电流中断的现象。文献[20]中的晶闸管开通与关断的脉冲信号是同时给的，为保证不会出现电流中断现象，关断脉冲信号经延时 T_{ms} 后发出。图6为互斥晶闸管开断示意图，其中两种颜色代表互斥组的两只晶闸管， t_0 为互斥晶闸管导通触发脉冲发送时刻， t_1 为互斥组中另一晶闸管关断触发脉冲发送时刻， t_2 为晶闸管导通时刻， t_3 为另一晶闸管关断时刻， t_0-t_3 时间段为晶闸管切换过程持续时间 T_q ， t_2-t_3 时间段为环路存在的时间。晶闸管的导通时间与关断时间可认为相等，因此环流持续时间 $T_c = t_3 - t_2 = t_1 - t_0 = T$ 。

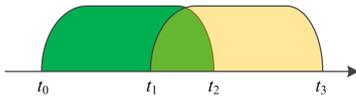


图6 互斥组晶闸管开断示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the thyristor breaking of a mutually exclusive group

晶闸管的开断速度达到 $400 \mu s$ ^[20]。由图6可知，当 t_1 时刻与 t_2 时刻重合时，切换过程切换时间 $T_q = 0.8 \text{ ms}$ ，则单个工频周期内可进行切换的次数为25；当 t_0 时刻与 t_1 时刻重合时，切换过程切换时间 $T_q = 0.4 \text{ ms}$ ，单个工频周期内可进行调压切换的次数为50。综上，如果在互斥组中的晶闸管尚未导通之前就发送脉冲关断另外一只晶闸管，则理论上分段式模型中互斥晶闸管在单个工频周期内可进行切换的次数 k 的范围是 $25 \leq k \leq 50$ ，回路存在的时间 T 范围为 $0 \leq T \leq 0.4 \text{ ms}$ ，而且随着晶闸管的发展，其切换上限还可能不断地提升。一般情况下，设计切换频率越高，调压装置对于电压长期波动行为的改善质量越好，而电力电子设备的总开关次数是一定

的，且单个工频周期内切换次数越多，相应的切换功耗也会增加，故互斥晶闸管的触发时间间隔的选择也至关重要。当电路中存在某些偶然因素导致互斥组中的晶闸管断开动作优先完成(即互斥晶闸管发生动作逻辑错乱)，则调压系统可能瞬间承受全部的高压侧电压而被击穿。环路存在时间过长会导致短路电流过大而烧坏设备，因此在互斥晶闸管两触发脉冲之间留有缓冲时间是非常必要的。为确定缓冲时间，固定互斥晶闸管中导通晶闸管的触发时刻，逐渐延迟关断晶闸管的触发时刻，描绘出的环路中存在的电流曲线如图7所示。

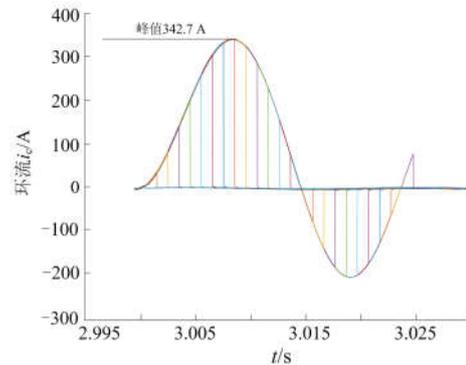


图7 互斥组晶闸管触发脉冲与环流的关系曲线
Fig. 7 Relationship between exclusion thyristor trigger pulse and the circulation of circulatory current

互斥组中晶闸管的导通时刻 t_2 为3 s，图中彩色竖线表示另一晶闸管的关断时刻 t_3 ，由图7环流曲线与坐标轴围成的面积可知当 t_3 与 t_2 的差值越大，环路电流存在的时间越长，产生的有功损耗越大。当 $t_3 \geq 3.01 \text{ s}$ ，即环路存在的时间超过半个工频周期时，环流的峰值可达到342.7 A；当 $t_3 \leq 3.01 \text{ s}$ 时，环流峰值随着环路存在时间的增大而增大。考虑到不能出现电压中断或电流中断现象，在保证 $t_1 \geq t_2$ 的情况下，至少应该在 t_1 与 t_2 还留有一段缓冲时间。为便于人工设置参数以及调压系统的统计，考虑将延迟时间设置为整数。环路存在的时间为1 ms时对应着环流的峰值仅为8.720 A，2 ms对应着39.292 A，其幅值为1 ms对应的环流幅值的数倍。综上，设置互斥晶闸管的触发脉冲的发送时间间隔为1 ms，则调压装置在单个工频周期内可连续切换14次。

3 分段式快速调压模型仿真

3.1 分段线圈匝数仿真

分段式快速调压仿真试验所用的配电变压器型号为SZ13-M-400/10，调压范围为 $\pm 2 \times 2.5\%$ ，短路电压百分比为3.84%，短路损耗为4306.3 W，通过计算可得到配电变压器一次侧等效电阻

$R = 2.6914 \Omega$, 等效电抗 $X = 9.6 \Omega$ 。仿真原理图由 Matlab 的 Simulink 库中的元件搭建而成。

由式(5)可知分段线圈等效阻抗越大, 切换所产生的环流越小, 但增加线圈匝数会增加绕组材料和铁芯材料, 增加变压器成本, 因此分段线圈匝数是协调环流与变压器成本的至关重要的因素。取线圈匝数比作为因变量, 依次按照向量 $C_0 = [0 \ 0.5\% \ 1\% \ 1.5\% \ 2\% \ 2.5\% \ 3.0\% \ 3.5\%]$ 中的新增分段匝数比值进行仿真计算, 匝数比变化与环流峰值的关系如图 8 所示。

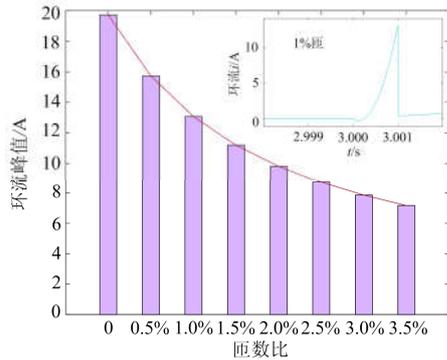


图 8 匝数变化与环流的关系曲线

Fig. 8 Relation curve of the change of the number of turns and the circulation

由图 8 可知, 新增分段绕组对切换过程形成的环路电流有显著的影响, 绕组匝数比增加至 1% 之前, 环路电流随绕组匝数的增加而下降较快, 绕组匝数比大于 1% 时, 环路电流随绕组匝数的增加而下降缓慢。由此可见, 新增绕组匝数比设置为 1% 较为合适。图 8 右侧为分段绕组匝数比为 1%, 互斥晶闸管的触发脉冲的发送间隔为 1 ms 所得的环路电流曲线, 该电流幅值为 13.072 A。

3.2 分段模型切换时刻仿真

调压装置切换档位时, 变压器绕组含有一定的初始电感能量, 这些能量中的一部分通过变压器主磁路继续转换为电能, 而另外一部分能量则在切换形成的环路中流通, 所以不同的初始状态对环路电流造成的影响势必不同。实验中从电压零点开始, 测试步长为 1 ms, 仿真计算后得出不同的触发时刻对环路电流产生的影响曲线如图 9 所示。

由图 9 可看出, 环流峰值的变化曲线接近正弦曲线, 与变压器一次侧的电压曲线变化步调基本一致, 并且两条曲线之间的相位差为零。因此与一次侧电压产生的零状态响应相比, 绕组中存在的初始电流对环流的影响可忽略不计。当变压器一次侧电压达到最大值而进行分接头切换时, 仿真环流曲线中正向幅值最大值为 112.706 A, 反向幅值最大值为

-119.690 A, 现有的电力电子开关器件能够轻易地满足此电流限制条件, 即调压装置可实现在任意时刻进行分接头的切换。

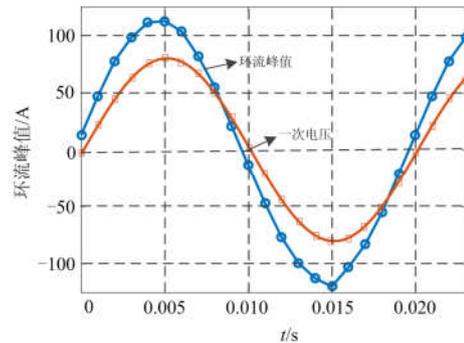
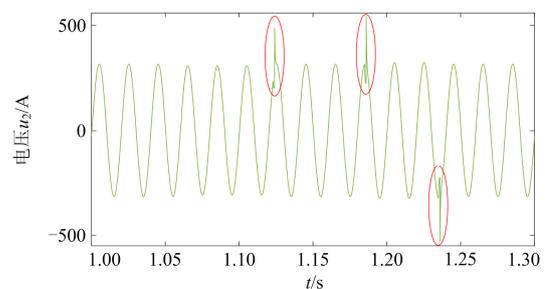


图 9 环流峰值与变压器一次侧电压的关系曲线

Fig. 9 Relationship between the circulation peak and the primary voltage of the transformer

3.3 分段模型切换时刻仿真

通过前两节的仿真结果可得配电变压器各绕组匝数为 $W0 = 94\%$, $W1 = W2 = W3 = W4 = 2.5\%$, $W5 = 5\%$, $W6 = W7 = W8 = W9 = W10 = 1\%$, 互斥晶闸管的触发脉冲的相隔时间为 1 ms, 切换调压过程可在任意时刻进行。仿真实验在这些参数条件下输出电压和电流的变化情况见图 10。实验中在 1.060 s 和 1.235 s 时刻进行了降压调节, 在 1.123 s 和 1.185 s 时刻进行了升压调节。图中红色圈出部分为调压过程中产生的毛刺, 毛刺存在的时间段为环路存在的时间段, 总时间长度为 1 ms, 对电压和电流的影响较小, 远小于机械式有载调压分接开关导致的电压电流波形的畸变程度, 所以波形中的毛刺可忽略不计。1.060 s 时对应变压器的电压为零, 该过程可进行无暂态调压^[21], 故调压过程不会产生毛刺。1.123 s 对应电压零点与波峰之间的某一点时刻, 1.185 s 和 1.235 s 分别对应着电压波形的波峰和波谷时刻。图 10(b)为图 10(a)的局部放大图, 从 10(b)中可看出进行调压操作后, 二次侧电压有电压升高和降低的现象, 变压器输出电流变化与电压变压情况类似。调压产生的环路电流则在短时间内迅速上升, 其幅值最大可达到 120 A, 现有的电力电子开关器件能够轻易找到与其幅值相匹配的晶闸管。



(a) 变压器二次侧电压

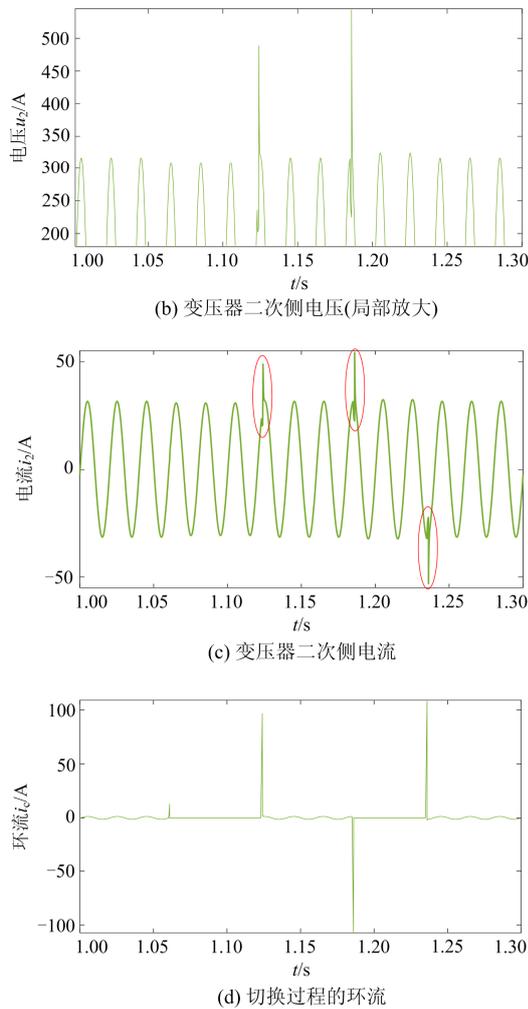


图 10 调压变压器仿真输出结果

Fig. 10 Simulation output of voltage regulating transformer

4 结论

本文设计研究出一种分段式快速调压模型，通过理论推导得到影响环路电流大小的因素，结合仿真模型得到分段式快速调压模型的中各绕组的匝数比以及互斥组中两个晶闸管之间的触发脉冲的发送间隔时间，并根据最终确定的分段式模型的参数进行了调压仿真。结果表明输出的电压电流质量较高，产生的短时毛刺对用户侧影响甚微，证明了分段式模型的可靠性可行性。该模型去掉了复杂的过渡电阻电路，简化了原有调压模型的调压流程，提高了调压过程的响应速度，减小了切换过程的功率损耗，使得切换过程可在任意时刻进行，可应用于电压变化较快的大功率场合。在实际场合中，该自动调压装置和无功补偿装置结合使用，对电压质量将有更好地改善作用。

参考文献

[1] 王金丽, 盛万兴, 方恒福, 等. 自适应负荷型配电变压器设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 86-92.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, FANG Hengfu, et al. Design of a self-adaptive distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 86-92.

[2] ECHANVARRIA R, CLAUDIO A, COTOROGEA M. Analysis, design, and implementation of a fast on-load tap changing regulator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 527-534.

[3] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.

[4] 余秀月, 宋少群, 郭瑞鹏, 等. 含电压源换流器的交直流混联电网无功优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 148-153.
YU Xiuyue, SONG Shaoqun, GUO Ruipeng, et al. Optimal reactive power flow model for AC/DC hybrid power grid with voltage source converters[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 148-153.

[5] 曹磊, 王蕊, 胡鹏飞. 低压配电网三相负荷不平衡解决方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16): 44-51.
CAO Lei, WANG Rui, HU Pengfei. Research on the solution for three-phase unbalanced load in low voltage distribution network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(16): 44-51.

[6] 尹项根, 王祯, 陈玉, 等. 配电变压器集成化补偿系统的多目标分析及控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 1-9.
YIN Xianggen, WANG Zhen, CHEN Yu, et al. Multi-object analysis and control of static synchronous compensators integrated with distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 1-9.

[7] 韩文庆, 周志勇, 王毅, 等. 基于负荷预测的区域变电站电压无功综合控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 68-72.
HAN Wenqing, ZHOU Zhiyong, WANG Yi, et al. Study of area substation voltage and reactive power control based on load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 68-72.

[8] 孙文生, 张明军. 关于“五区图”电压无功综合控制原理的再讨论[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 69-75.
SUN Wensheng, ZHANG Mingjun. Further discussion on “five-zone” theory in the area of voltage and reactive

- power synthetical control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 69-75.
- [9] 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.
- [10] 李晓明. 连通拓扑组合状态有载调压原理与应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
LI Xiaoming. Research on principles and applications of on load tap changing voltage with connectivity topology assembling state[J]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.
- [11] 赵刚, 施围. 无弧有载分接开关的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 49-51.
ZHAO Gang, SHI Wei. Study on arcless onload tap changer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 49-51.
- [12] 夏东升, 王华芳, 马文博, 等. 基于晶闸管的配电变压器有载自动调压系统设计[J]. 高压电器, 2017, 53(12): 168-174.
XIA Dongsheng, WANG Huafang, MA Wenbo, et al. On-load automatic voltage regulation system with thyristors for distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 168-174.
- [13] 杨晓光. 基于电力电子技术的自动调压分接开关的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
YANG Xiaoguang. Research on on-load automatic tap-changer based on power electronic technology[D]. Harbin: Northeast Agriculture University, 2007.
- [14] 王金丽, 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.
- [15] 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. Contactless OLTC system based on dynamic model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 52-57.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李晓明, 皮伟才. 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. Method of switching mutual repulsive thyristors switch in the tap changing process of on load transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 65-68.
- [21] 万凯, 刘会金, 陈允平. 考虑铁磁特性的有载调压变压器无暂态切换过程的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 170-174.
WAN Kai, LIU Huijin, CHEN Yunping. Research on the no transience process of the tap change in the load-ratio voltage transformer considering the ferromagnetic characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 170-174.

收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2019-01-08

作者简介:

宋开胜(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从配电变压器调压研究以及电气设备故障诊断研究; E-mail: sks_8866@163.com

马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等;

王华芳(1979—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为配电运检。

(编辑 周金梅)