

基于 IGBT 的配电变压器有载调压开关参数设计及分析

周念成¹, 苏宇¹, 王强钢¹, 葛军凯², 高俊青³, 张静³

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 国网浙江杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100;

3. 浙江群力电气有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要:对比了机械式、混合式和全电力电子式配电变压器有载调压开关(OLTC)的结构特点,提出了一种基于绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的配电变压器 OLTC 电路结构和控制方案,给出了该 OLTC 主电路 IGBT 器件、过渡电路和吸收电路的参数设计方法,推导了所设计 OLTC 的有功损耗计算式。所提方案克服了机械式 OLTC 动作慢、切换产生电弧等缺点,可辅助配电变压器实现快速、无弧的有载调压。搭建了仿真模型和实验平台,对 OLTC 的调压性能进行了测试,分析了开关参数对其有功损耗及 IGBT 承受电流电压的影响,将仿真、实验和理论计算结果对比,验证了所提有载调压方案的有效性。

关键词:配电变压器;有载调压开关;绝缘栅双极型晶体管;参数设计;有功损耗

中图分类号:TM 403.4

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.005

0 引言

配电网的“低电压”问题严重影响设备的安全经济运行和用户的优质可靠供电,对此须弥补配电网无功补偿容量的不足,同时还要加强系统的电压无功调节能力^[1]。特别是增强面向终端用户的配电变压器调压自由度,其与变电站的自动电压控制相协调,才能实现“低电压”问题的有效治理^[2]。2015 年 8 月工信部、质检总局和发改委联合发布《配电变压器能效提升计划》,指出需对包括有载调压配电变压器在内的新型高效配电变压器技术展开研究。因此,从“低电压”治理和变压器能效提升的角度出发,有必要研究配电变压器的有载调压技术方案。

配电变压器有载调压开关(OLTC)可分为机械式^[3-5]和电力电子式^[1,6-14]2 类。前者由带过渡电抗或电阻的切换开关与选择开关构成,由传动机构执行调压操作,其技术成熟并且应用广泛。机械式 OLTC 的切换开关正从油浸介质向真空化转变^[4],尽管这样能改善灭弧性能和减少维护量,但在应用中仍暴露出切换速率低、易发生级间短路等明显不足^[5],其已成为变压器的主要故障部件之一。为解决该问题,采用电力电子技术的 OLTC 成为研究和应用的热点,电力电子式 OLTC 分为以下 2 种^[6-7]。

a. 混合式 OLTC:利用电力电子器件减小机械

开关的电弧,仅增加了电力电子器件组成的辅助电路,仍保留机械有载调压部分。

b. 全电力电子式 OLTC:用电力电子器件完全取代机械触头。

文献[8]采用门极可关断晶闸管(GTO)组成辅助电路以构建混合式 OLTC,文献[9]对比了 3 种混合式的无弧 OLTC 方案;在此基础上,文献[7]改进混合式 OLTC 的触发方式,以机械组件运动实现晶闸管无源触发,但是由于保留了机械触头部分,混合式 OLTC 在调压速度、结构复杂度等方面存在不足。

采用全电力电子器件的 OLTC 具有更好的控制性能,能有效消除开关切换电弧^[6,10-12]。文献[1,6,10]设计了用反并联晶闸管的 OLTC 主电路及光纤触发方案,文献[11]则采用主动分流的思想对其主电路进行改进设计。但是上述电力电子式 OLTC 在负载为感性时,可能出现晶闸管无法触发的问题,严重影响 OLTC 的可靠操作^[12-13]。为此,文献[12-14]初步设计了基于 GTO、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等全控电力电子器件的 OLTC 方案。随着 IGBT 的问世,开关器件成本、耐压和耐流参数得到了长足进步^[15],为基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 产业化创造了条件。但是,文献[13]在基于 IGBT 的全电力电子式 OLTC 参数设计时,认为变压器的漏感和开关的关断电流变化率较小,忽略了限流电感和缓冲电路;文献[14]仅对缓冲电路进行设计,未考虑引入过渡电路,无法对抽头切换过程进行限流。为应对 IGBT 器件对短时过电压和过电流的高灵敏性^[16],对于基于 IGBT 的配电变压器 OLTC,需要更可靠的保护电路方案和更精细的参数设计及性能分析。为此,本文提出一种基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 主电路及控制方案,分析三相短路故障、切换过程中 IGBT 器件承受的电流、电压大小,由此设计

收稿日期:2017-02-07;修回日期:2018-05-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607015);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(106112016CDJXY-150001);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2016jcyjA0402)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607015), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(106112016CDJXY150001) and Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology(cstc2016jcyjA0402)

IGBT 器件、过渡电路电阻、吸收电路电阻及电容参数,推导 OLTC 各组成部分的有功损耗,通过仿真和实验测试了所提 OLTC 方案的调压效果和性能指标。

1 基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 方案

1.1 不同类型 OLTC 的结构对比

a. 机械式 OLTC。

机械式 OLTC 的典型结构见图 1,其通过电动机来调整图中切换开关 S 的位置,以转换流过抽头的电流,从而改变变压器一次侧中有效接入电路的线圈匝数,调节变压器二次侧的输出电压^[3-4]。由于负载电流的存在,切换开关 S 移动的过程中必然会产生电弧,将大幅缩短切换开关 S 和机械触头的寿命,增加其维护成本和故障风险,降低 OLTC 可靠性。

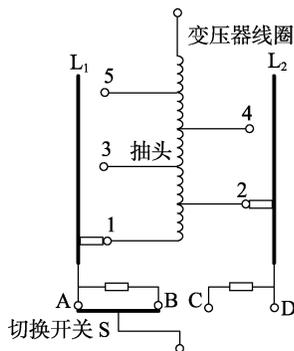


图 1 机械式 OLTC 典型结构

Fig.1 Typical structure of mechanical OLTC

此外,切换开关 S 的动作速度缓慢,导致调压时间变长,使得系统电压波动对负荷的影响增大。因此,机械式 OLTC 虽然结构简单,但由于存在切换速率低、维护量大等问题,已成为变压器的主要故障部件^[17]。特别地,机械故障是其主要故障类型,而机械式 OLTC 存在的触头接触不良等电气故障,大多也是由于传动机构失效或切换不到位等机械缺陷引起的。

b. 混合式 OLTC。

混合式 OLTC 保留了机械式 OLTC 的机械触头部分,采用真空开关 S_0 — S_2 和电力电子开关对 SR_1 、 SR_2 ,代替过渡电路中的切换开关 S,整个调压过程中不会产生电弧^[7],其典型结构如图 2 所示。混合式 OLTC 解决了机械式开关切换产生电弧的问题,减少了开关的维护和检修工作。但是,该开关仍保留了机械触头,动作速度并没有明显提高,并且增加的电力电子器件使得 OLTC 控制需协调机械和电力电子开关的配合,会加大相应操作和控制的复杂度。

c. 全电力电子式 OLTC。

图 3 为全电力电子式 OLTC 典型结构图^[1,6],该结构采用电力电子开关完全取代了机械触头,通过

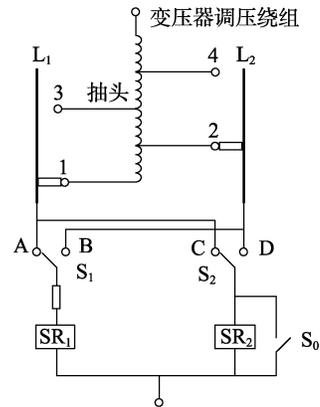


图 2 混合式 OLTC 典型结构

Fig.2 Typical structure of hybrid OLTC

控制开关 S_1 — S_4 的通断选择合适的抽头接入电路,进而调整变压器二次侧的输出电压。图中 R 为开关切换过程的限流电阻,该方案可实现分接开关的无触点快速切换,解决机械切换开关的电弧问题。

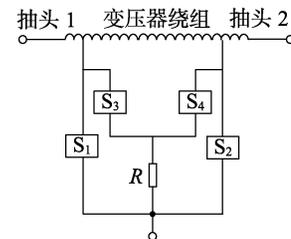


图 3 全电力电子式 OLTC 典型结构

Fig.3 Typical structure of full-electronic OLTC

机械式 OLTC 的弊端主要是由机械触头运动引起的,而全电力电子式 OLTC 完全避免了使用机械触头,从而具有切换速率快、控制灵活、无触点无弧调压等优势。但是配电变压器带负载运行过程中,导通的电力电子器件长时间流通负载电流,开关的通态损耗高。且电力电子器件对过电压和过电流有较强的敏感性,这制约了调压开关的可靠性,因此需要更加合理地设计开关结构和参数。

1.2 基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 主电路及控制

目前,全电力电子式 OLTC 多采用反并联晶闸管,但晶闸管为半控型电力电子器件,具有功耗高、开关频率低等缺点,并且调压中可能出现开关关断失败等问题^[13]。因此,本文利用大功率的全控型电力电子器件 IGBT,开发响应时间快、控制灵活的配电变压器 OLTC。针对 10 kV/0.4 kV 配电变压器,设计基于 IGBT 的 OLTC 主电路如图 4 所示(图中, U_N 为一次侧额定线电压)。配电变压器的高低电压绕组采用 Δ/Y_n 接线,其中高压侧 OLTC 的分接范围为 $\pm 5\%$,对应于高压绕组的 3 个抽头和切换电路 S_1 — S_3 。若增加变压器的调压级数,仅需增加高压绕组抽头和切换电路的个数;主电路中还设计了过渡电路 S_x ,以限制切换过程的环流。OLTC 的调压操作由执行机构实现,其操作电源从变压器低压侧获取。

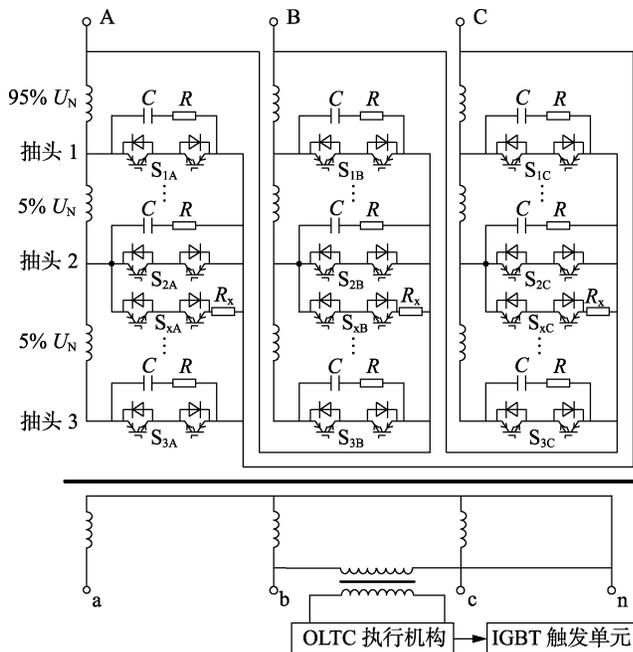


图 4 基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 主电路

Fig.4 Main circuit of OLTC based on IGBT for power distribution transformer

图 4 中,每个切换电路都由 2 个 IGBT 及其反向并联的电力二极管构成;开关导通时,2 个 IGBT 均处于导通状态,由于负载电流方向变化,该电流仅经由其中 1 个 IGBT 和与之串联的二极管流通;开关关断时,2 个 IGBT 都处于阻断状态,开关两端电压作用在单个 IGBT 两端。反向并联的二极管不仅给开关中另一个 IGBT 提供了电流通路,而且将与其并联 IGBT 的反向压降限制在二极管导通压降内,由此解决 IGBT 反向耐压能力弱的问题。此外,并联在开关两端的阻容吸收电路,限制了 IGBT 关断时产生的尖峰电压,保护 IGBT 不被正向击穿。配电变压器各抽头经电力电子开关接入回路,再利用 OLTC 控制机构发送 IGBT 触发信号来调节配电变压器抽头,执行机构硬件框图如图 5 所示。

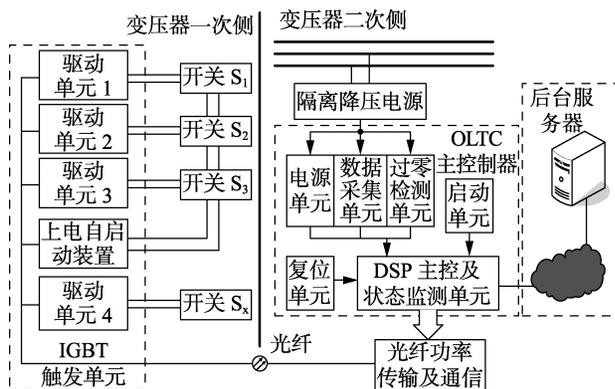


图 5 OLTC 执行机构硬件框图

Fig.5 Hardware block diagram of OLTC actuator

配电变压器 OLTC 执行机构由隔离降压电源、主控制器、光纤功率传输及通信、IGBT 触发驱动单

元组成,可通过以太网向后台服务器上传 OLTC 各部分的状态信息和各 IGBT 电压、电流监测数据,接收后台发送的调压指令。图 5 中 IGBT 触发驱动单元根据主控制器的调压策略,按预定逻辑和时序向各 IGBT 发送触发信号,内置欠压、过压和短路的驱动保护电路以及器件故障检测回路。配电变压器的一次侧驱动单元和二次侧主控制器都需高压隔离,前者使用光纤功率传输将电源传输到驱动单元,后者从配电变压器二次侧上获得电源。

设备启动前二次侧没有电压,此时 OLTC 主控制器不工作,这就需要一次侧有上电自启动功能,在配电变压器二次侧没有电源的情况下通过一次侧供电就能配电使变压器工作。因此,OLTC 主控制器需专门的自启动单元,在检测到二次侧没有供电的情况下通过一次侧开关两端电压对其供电,以使配电变压器一次侧能够正常工作。正常运行中若在某一时刻直接进行抽头切换,由于 IGBT 动作时间不完全一致,容易出现 2 个开关都阻断的情况,导致调压时负载电流中断。为保证变压器抽头切换时负载电流的连续,切换过程中至少应有 1 个开关处于导通状态,这样又会出现 2 个开关同时导通产生环流的情况,为限制环流在图 4 主电路中须引入 S_x 对应的过渡电路。

因此,OLTC 主控制器调压策略中需协调切换开关和过渡电路各个 IGBT 的触发时序,以获得配电变压器 OLTC 的自动调压流程,如图 6 所示。图中, U_2 为变压器二次侧监测电压; U_{2N} 为变压器二次侧额定

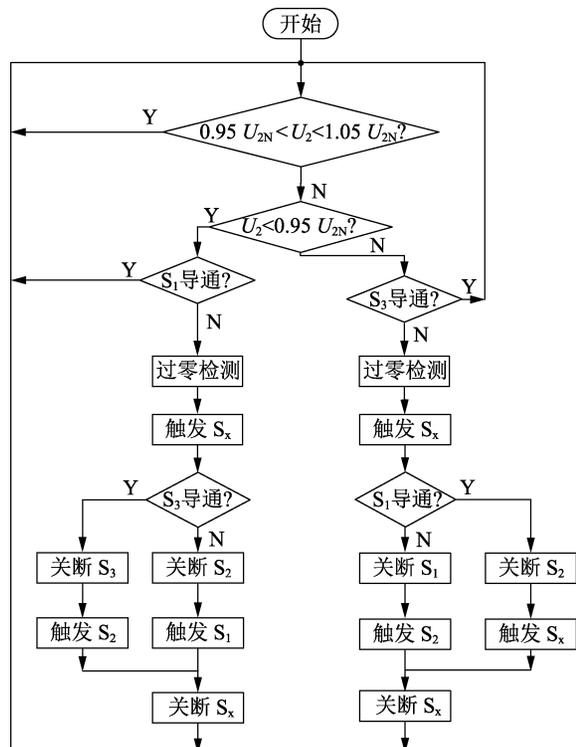


图 6 OLTC 自动调压流程图

Fig.6 Flowchart for automatic voltage regulation of OLTC

电压。具体的调压过程包括:

a. 按配电变压器二次侧监测电压判断是否需要调压;

b. 根据各 IGBT 导通情况判断能否进行调压,并通过查表获取预定的触发时序;

c. 调压执行时先导通支路 S_x , 关断已经导通的开关 S_1 、 S_2 或 S_3 , 再按准备投入的抽头档位, 导通对应的切换开关, 最后关断开关 S_x 即完成调压。

整个调压过程中负载电流连续, 尽管会出现 2 次短时的环流, 但都被过渡电路的限流电阻 R_x 所限制。

2 配电变压器 OLTC 的参数设计

2.1 IGBT 额定参数

针对 SCB10-630kVA 型 10 kV/0.4 kV 干式配电变压器设计基于 IGBT 的 OLTC 参数, 考虑到配电变压器会遭受二次侧短路引起的过电流, 短路电流最大的情况对应于配电变压器高压侧为无穷大系统、低压侧发生三相短路的情况, 此时计算配电变压器一次侧的短路电流为:

$$I_d = \frac{U_N}{\sqrt{3} \sqrt{R_s^2 + X_s^2}} \quad (1)$$

其中, R_s 和 X_s 分别为配电变压器短路电阻和电抗。SCB10-630kVA 型配电变压器归算至一次侧的短路阻抗为 $3.45 + j27.78 \Omega$, 由式 (1) 可得 IGBT 承受的最大短路电流为 206.25 A, 其峰值达 291.68 A, 为此选择 IGBT 额定电流取为 300 A。

由于配电变压器高压侧采用 Δ 接线, 切换电路的 IGBT 连接在变压器一次侧的两相绕组间。若配电变压器主抽头向上、向下均有 n_1 个可调抽头, $d_r\%$ 为 2 个相邻抽头间绕组电压占额定电压百分比, 即变压器抽头间最高电压为 $2n_1 \times d_r\%$ 的额定电压, 则 IGBT 须承受的最大峰值电压为:

$$U_M = k \times 2\sqrt{2} n_1 \times d_r\% \times U_N \quad (2)$$

其中, k 为考虑电压波动、负荷冲击等外部因素引入的可靠系数, 取值范围为 1.2~1.5。根据图 4 所示的配电变压器的调压范围, 其 IGBT 承受的最高电压峰值为 1 414.21 V, 选择 $k=1.2$, 则 IGBT 的额定电压取为 1 700 V。因此, 本文选择 1 700 V/300 A 的大功率 IGBT 器件作为 OLTC 的电力电子开关。

2.2 过渡电路参数

过渡电路在配电变压器抽头切换中接入电路, 起到确保负载电流连续和限制环流的作用^[18]。为保证抽头切换时环流不会对 IGBT 产生损坏, 过渡电路须根据环流大小选择限流电阻。图 7 为开关切换时过渡电路与相连绕组形成的等效电路, 图中, $u(t)$ 为电源电动势, R_e 和 L_e 分别为漏阻抗对应的等效电

阻和电感, 则回路电流平衡方程为:

$$(R_e + R_x) i(t) + L_e \frac{di(t)}{dt} = u(t) = U_M \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

其中, U_M 为电源电动势幅值。

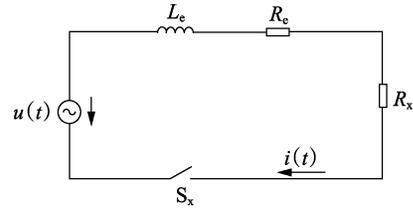


图 7 过渡电路投入后等效电路

Fig.7 Equivalent circuit after activation of transition circuit

过渡电路投入后回路环流将由直流暂态分量和周期强制分量组成, 设投入时环流初始值为 I_0 , 可推得回路环流的计算式为:

$$\begin{cases} i(t) = I_{dc0} e^{-\frac{(R_e + R_x)}{L_e} t} + \frac{U_M}{\sqrt{(\omega L_e)^2 + (R_e + R_x)^2}} \times \\ \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\omega L_e}{R_e + R_x}\right) \\ I_{dc0} = I_0 - \frac{U_M \omega L_e}{(\omega L_e)^2 + (R_e + R_x)^2} \end{cases} \quad (4)$$

由此可知, 回路环流大小与电阻 $R_e + R_x$ 和电感 L_e 有关, R_x 投入可以加快回路环流暂态直流分量的衰减速度, 同时还降低了稳态分量的幅值, 对限制回路环流作用显著。对于 SCB10-630kVA 型配电变压器, 切换过程的等效阻抗对应的等效电阻和电感分别约为 1.64Ω 和 6 mH , 当限流电阻 $R_x = 6 \Omega$ 时回路环流最大值为 89.86 A, 选择该限流电阻即可将环流限制在 90 A 以下。

2.3 吸收电路参数

图 4 中阻容吸收电路用于限制 IGBT 关断时的过电压, 保证 IGBT 不被击穿。为了保证阻容吸收电路可靠工作, 要求在 IGBT 关断时, 电容 C 能够吸收储存在 L_e 中的能量, 而在 IGBT 导通期间能完全释放电容上的储能^[19-20]。为此, 对缓冲电路电阻 R 和电容 C 的要求为:

$$\begin{cases} C = L_e I^2 / \Delta U^2 \\ 2\sqrt{L_e / C} \leq R \leq t_0 / (4C) \end{cases} \quad (5)$$

其中, I 为关断时流过 IGBT 的电流; ΔU 为等效电感产生的过电压; t_0 为 IGBT 的导通时间。设吸收电容两端电压的最大值为 U_{\max} , 电网频率为 f , 则电阻吸收的有功功率可由式 (6) 计算。

$$P = f C U_{\max}^2 \quad (6)$$

阻容吸收电路的参数与接入电路的等效电感有

关,由于该电感不易准确获取,因此阻容吸收电路的参数可参照表 1 经验参数^[20]选取。对于 SCB10-630kVA 型配电变压器,正常运行时配电变压器一次侧流过 IGBT 的额定电流为 21 A,按表 1 选取的电容量为 0.2 μF 、额定电压为 2 000 V、电阻为 40 Ω 、有功功率为 40 W。

表 1 阻容吸收电路典型参数选取

额定 电流/A	电容/ μF	电阻/ Ω	额定 电流/A	电容/ μF	电阻/ Ω
500	1.00	5	50	0.20	40
200	0.50	10	20	0.15	80
100	0.25	20	10	0.10	100

3 配电变压器 OLTC 的有功损耗计算

基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 正常运行时的有功损耗主要包括 IGBT 及二极管通态损耗、阻容吸收电路有功损耗和限流电阻损耗。过渡电路限流电阻仅在开关切换的过渡过程中才投入,切换完成后即切出。该过渡过程的持续时间远小于 OLTC 正常负载运行的时间,因此限流电阻的短暂有功损耗也小于 OLTC 长时间正常运行的有功损耗,因此在计算 OLTC 额定有功损耗时忽略限流电阻的附加损耗。

a. IGBT 及二极管通态损耗。

在 OLTC 正常工作时,每相绕组仅有 1 个 IGBT 和电力二极管导通,设 IGBT 导通压降为 $v_{\text{CE}}(t)$,流过 IGBT 的电流为 $i_{\text{C}}(t)$,则其通态损耗^[21]表示为:

$$P_{\text{I}} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} v_{\text{CE}}(t) i_{\text{C}}(t) d(\omega t) \quad (7)$$

$v_{\text{CE}}(t)$ 与 $i_{\text{C}}(t)$ 之间存在非线性函数关系,为降低计算复杂度,将两者之间的函数关系采用线性化近似为:

$$v_{\text{CE}}(t) = V_{\text{CE0}} + r_{\text{CE}} i_{\text{C}}(t) \quad (8)$$

其中, V_{CE0} 为 IGBT 门槛电压; r_{CE} 为 IGBT 通态等效电阻。由于负载电流 $i_{\text{C}}(t)$ 为工频交流电流,即 $i_{\text{C}}(t) = I_{\text{CM}} \cos(\omega t)$,则 IGBT 通态损耗可简化为:

$$P_{\text{I}} = \frac{2}{\pi} V_{\text{CE0}} I_{\text{CM}} + \frac{1}{2} r_{\text{CE}} I_{\text{CM}}^2 \quad (9)$$

其中, I_{CM} 为负载电流幅值。

同理,可得电力二极管通态损耗为:

$$P_{\text{D}} = \frac{2}{\pi} V_{\text{D}} I_{\text{CM}} + \frac{1}{2} r_{\text{D}} I_{\text{CM}}^2 \quad (10)$$

其中, V_{D} 为电力二极管门槛电压; r_{D} 为电力二极管通态等效电阻。

b. 阻容吸收电路有功损耗。

阻容吸收电路有功损耗主要集中在未导通 IGBT 两端的吸收电阻上,对应的等效电路如图 8 所

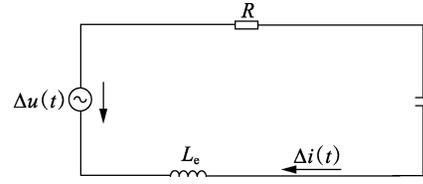


图 8 阻容吸收电路的等效电路

Fig.8 Equivalent circuit of RC absorbing circuit

示。图中 $\Delta u(t) = n \Delta U_{\text{M}} \cos(\omega t)$, n 为调压绕组个数, $\Delta U_{\text{M}} = \sqrt{2} d_{\text{R}} \% \times U_{\text{N}}$ 为单个调压绕组上的电压峰值。根据图 8 所示的等效电路可得吸收电阻的电流 $\Delta i(t)$ 为:

$$\Delta i(t) = \frac{n \Delta U_{\text{M}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L_{\text{c}} - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} \times \cos \left[\omega t - \arctan \frac{\omega L_{\text{c}} - 1/(\omega C)}{R} \right] \quad (11)$$

则电阻 R 上的有功损耗为:

$$P_{\text{R}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Delta i^2(t) R d(\omega t) = \frac{n^2 \Delta U_{\text{M}}^2 R}{2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} \quad (12)$$

c. OLTC 额定有功损耗。

基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 额定有功损耗即为 ABC 三相有功损耗之和,每相有功损耗由 IGBT 通态损耗 P_{I} 、电力二极管通态损耗 P_{D} 、阻容吸收电路损耗 P_{R} 组成,则 OLTC 额定有功损耗表示为:

$$P_{\text{N}} = \sum_{\text{A,B,C}} P_{\text{I}} + \sum_{\text{A,B,C}} P_{\text{D}} + \sum_{\text{A,B,C}} P_{\text{R}} \quad (13)$$

其中, $\sum_{\text{A,B,C}}$ 表示对三相损耗求和。

将配电变压器 OLTC 的各参数代入计算可知,阻容吸收电路有功损耗远小于 IGBT 通态损耗。在计算精度要求不高的情况下,可直接将 IGBT 与电力二极管通态损耗之和作为 OLTC 的额定有功损耗,以减少运算量。根据 SCB10-630kVA 型配电变压器的 OLTC 各部分参数,将 3 个抽头每相的 IGBT、电力二极管通态损耗和 2 组阻容吸收电路的有功损耗相加,可得该配电变压器 OLTC 的额定有功损耗为 103 W。

4 基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 仿真和实验分析

4.1 OLTC 调压过程仿真结果

为便于对比,在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 4 所示的三相 OLTC 仿真模型和附录中图 A1 所示的单相 OLTC 仿真模型,测试设计的基于 IGBT 的配

电变压器 OLTC。采用多绕组变压器作为含 3 个抽头的调压变压器,按 SCB10-630 kVA 型配电变压器 OLTC 的主电路参数及控制策略搭建仿真模型,负载侧带有断路器投切以模拟二次侧高峰和低谷负荷变化的扰动,分析 OLTC 自动调压的效果。仿真开始时设开关 S_2 导通,额定抽头接入电路,OLTC 上电后正常工作,此时配电变压器二次侧电压满足规定要求。

在 $t=0.12\text{ s}$ 时通过断路器增大二次侧负载,使变压器二次侧电压降低越限。主控制器监测到电压过低后,将抽头 2 切换到抽头 1(即从开关 S_2 导通切换到开关 S_1 导通),以调高输出电压。因此,在电压过零点($t=0.14\text{ s}$)处闭合 S_x ,在下一个电压过零点处关断开关 S_2 ;然后在 $t=0.16\text{ s}$ 时闭合开关 S_1 , $t=0.17\text{ s}$ 时关断 S_x ,抽头切换完毕,电压恢复到规定范围内。在 $0.13\sim 0.18\text{ s}$ 时段内,各个开关 IGBT 两端的电压和流通的电流波形如图 9 所示(图中, $i=1, 2, 3, x$)。图 9 中,尽管开关每次都在电压过零点动作,但仍会有一些小幅电压和电流过冲。 $t=0.14\text{ s}$ 时闭合 S_x 没有导致其他开关出现过电压,这是因为导通的 S_2 将 S_x 短路,此时闭合 S_x 只会与 S_2 产生环

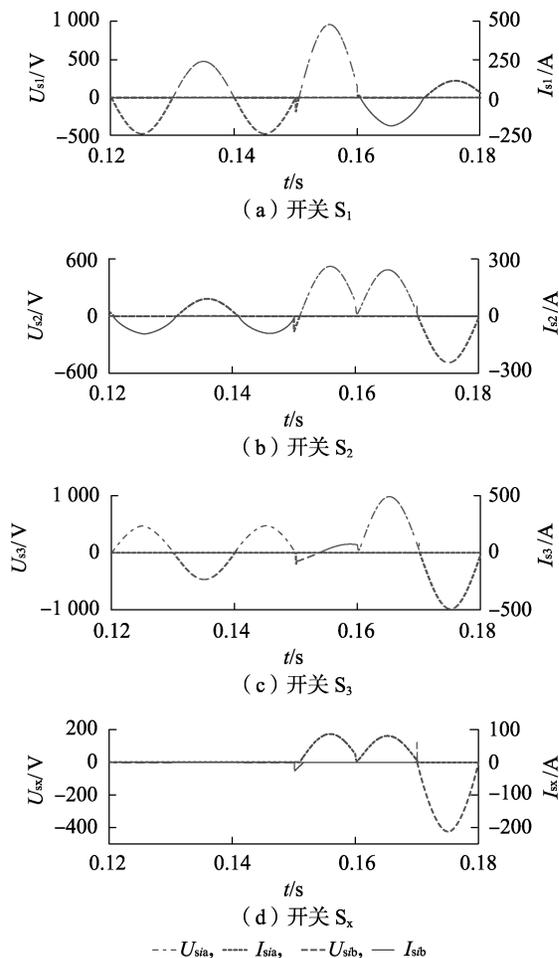


图9 各 IGBT 端电压和电流仿真结果

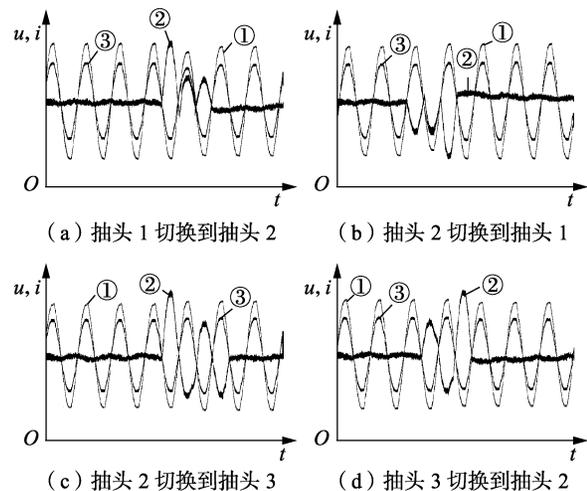
Fig.9 Simulative results of terminal voltages and currents of each IGBT

流,又因为 S_x 过渡电路中有限流电阻,所以流过 S_x 的电流较小,流过 S_2 的电流基本不变。

而在 $t=0.15\text{ s}$ 时关断开关 S_2 ,使 S_1-S_3 两端都产生了一定的过冲电压,这是因为开关 S_2 关断瞬间,虽然 S_x 为 S_2 提供了电流通路,但 S_2 中的电流由于限流电阻无法完全由 S_x 释放,导致 S_1-S_3 两端产生截流冲击电压。在 $t=0.16\text{ s}$ 时闭合开关 S_1 ,各开关均无冲击电压,导通的 S_1 与 S_x 会产生环流,其中, S_1 起主导作用使得 S_x 中流过的电流反向, S_2 和 S_3 所承受的电压反向。通过分析仿真结果发现:电压和电流过冲发生在 IGBT 关断时刻,在电压过零点关断 IGBT 产生的过电压峰值,都低于其正常运行的电压峰值,计算的 IGBT 耐压参数满足要求。

4.2 OLTC 调压过程实验结果

建立低电压 $600\text{ V}/220\text{ V}$ 单相 OLTC 实验平台,采用本文的主电路参数设计方法和控制策略,确定低压实验平台的元件参数、编写 DSP 主控制器的调压程序。图 10 为不同抽头切换过程中配电变压器的输出电压和电流、过渡电路电流的实验结果。



①—变压器电压,②—变压器电流,③—过渡电路电流

图 10 过渡电路及配电变压器输出实验结果

Fig.10 Experimental results of outputs of transition circuit and power distribution transformer

图 10 中,在调高或调低配电变压器输出电压的过程中,配电变压器的输出电压、电流没有产生明显畸变,且经过调整后电压都回到了预定范围。这验证了本文所提基于 IGBT 的 OLTC 方案和参数设计的可行性,该方案在调压过程中避免了机械式 OLTC 的电弧问题,并且采用 DSP 主控制器能够实现电压的自动监测与调整。图 10 中波形与基于实验平台参数的仿真波形基本一致,抽头切换过程中,IGBT 两端的过冲电压峰值低于正常运行的电压峰值。这说明本文方案中在电压过零点操作 IGBT 器件以及增加阻容吸收电路能有效抑制 IGBT 两端的过电压。同时,采用先投入过渡电路的调压方案时,调压过程

中环流峰值对 IGBT 稳定运行的影响不显著。

4.3 OLTC 主要性能指标对比

为验证本文参数设计的有效性,针对 SCB10-630kVA 型 10 kV/0.4 kV 配电变压器和实验采用的 600 V/220 V 配电变压器,将多个调压工况测试中 IGBT 所承受的最大峰值电压、最大峰值电流和 OLTC 额定有功损耗的仿真和实验值与设计的计算值进行对比,结果见图 11。其中,对 10 kV/0.4 kV 案例采用三相 OLTC 仿真模型,对 600 V/220 V 案例采用单相 OLTC 的仿真模型和实验平台。图 11 中 600 V/220 V 案例的 3 个主要性能指标实验值都略大于仿真值,以最大峰值电流的相对误差最大(9.26%),仿真和实验相对误差不超过±10%,在可接受范围内,由此验证了本文建立的仿真模型的正确性。

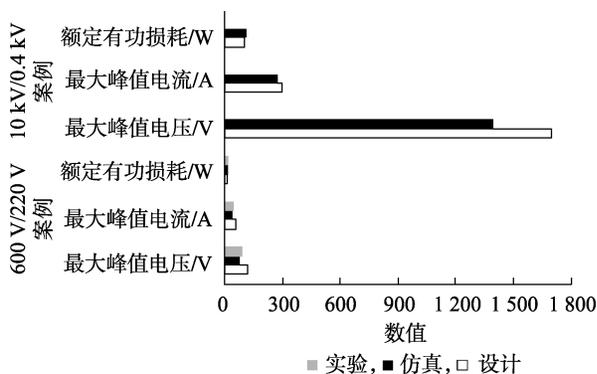


图 11 最大峰值电压、峰值电流和额定有功损耗结果对比

Fig.11 Comparison of maximum peak voltage, peak current and rated active power loss

在 10 kV/0.4 kV 案例中仅对比仿真结果和设计的计算值,可见仿真所得在不同工况下 IGBT 承受的最大峰值电压为 1 398.14 V,最大峰值电流为 277.8 A。在 600 V/220 V 案例中,这 2 个指标的实验值分别为 87.68 V 和 42.6 A。所以不同案例下,上述 2 个指标的仿真和实验结果均小于本文方法设计的计算值。同时,10 kV/0.4 kV 案例中仿真得到的三相 OLTC 额定有功损耗为 110 W,与理论计算值 103 W 基本一致。这说明本文的参数设计方法满足基于 IGBT 的 OLTC 运行要求,本文方案能够可靠地调节配电变压器的输出电压。

4.4 OLTC 性能指标的参数灵敏度分析

以 SCB10-630kVA 型配电变压器为对象,利用三相 OLTC 仿真模型,分析过渡电路的限流电阻、阻容吸收电路的吸收电容和电阻参数对 IGBT 承受的电压和电流峰值、各部分损耗的影响。图 12 为仅改变 R_x 大小而其余参数不变的情况下,过渡电路的环流峰值、抽头切换时过渡电阻平均能量损耗的变化曲线。随着过渡电阻从 1 Ω 逐渐增大到 18 Ω ,过渡电路的环流峰值呈现持续减小的趋势;而单次抽头切换时过渡电阻平均能量损耗先大幅减小后缓慢增

大,最低值对应的 R_x 介于 5.7 Ω 和 6.2 Ω 之间。按本文方法设计的 R_x 为 6 Ω ,其在过渡电阻能量损耗最低的电阻区间内,并且仿真所得过渡支路的环流峰值为 86.84 A,与计算值基本一致。

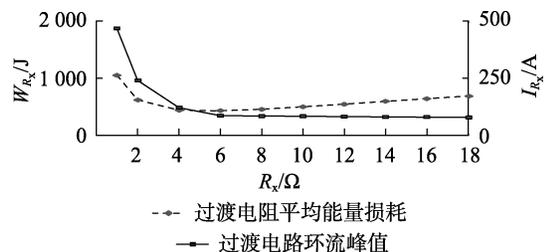


图 12 过渡支路的环流峰值和平均能量损耗随电阻的变化

Fig.12 Peak value of circulating current and average energy loss vs. resistance in transition circuit

图 13 分别为单独改变阻容电路的吸收电容和电阻的大小而其余参数不变的情况下,IGBT 关断过电压峰值和吸收电路有功损耗的变化曲线。由图 13 可见,随着吸收电容和吸收电阻的增大,IGBT 过电压峰值会逐渐减小,而吸收电路有功损耗增大。因此,吸收电路参数的选择需要保持 IGBT 关断过电压峰值与吸收电路有功损耗之间的平衡。本文选择的 0.2 μF /2 000 V 吸收电容和 40 Ω /40 W 吸收电阻处于阻容参数的较优区间内,满足配电变压器 OLTC 的运行要求。

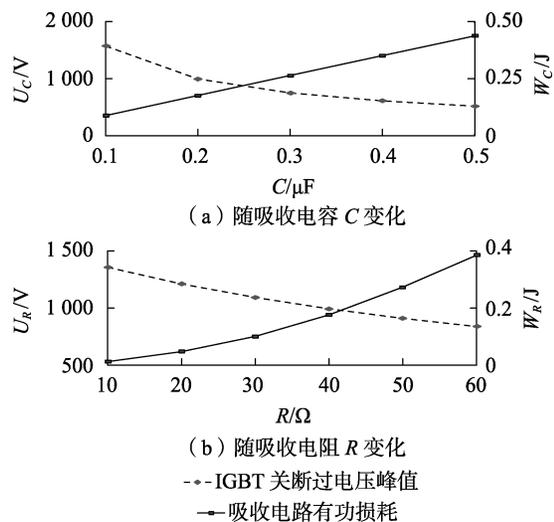


图 13 关断过电压峰值和吸收电路有功损耗随吸收电容和电阻变化

Fig.13 Turn-off peak value of overvoltage and circuit active power loss vs. absorbing capacitance and resistance

5 结论

本文提出了一种基于 IGBT 的配电变压器 OLTC 主电路方案和参数设计方法,通过理论计算、模型仿真和实验测试,得到如下结论:所提基于 IGBT 的 OLTC 主电路及控制器可实现配电变压器抽头的无

弧、快速和灵活切换; OLTC 中引入过渡电路可在保证负载电流连续的同时,限制回路的环流,减轻开关切换对 IGBT 的冲击;阻容吸收电路能在 IGBT 关断时限制其两端过电压,保护 IGBT 不被击穿,确保基于 IGBT 的 OLTC 可靠工作。根据参数灵敏度分析还发现:限流电阻增大会使过渡电路的环流不断减小,而过渡电阻能量损耗先大幅减小后缓慢增大;增大吸收电容和吸收电阻会减小 IGBT 关断过电压,但会导致吸收回路有功损耗增大。本文设计的主电路元件参数,不仅满足 OLTC 运行要求,还处于各项性能指标较优的参数区间内。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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(18):86-92,119.
WANG Jinli, SHENG Wanxing, FANG Hengfu, et al. Design of a self-adaptive distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 86-92, 119.
- [3] 朱英浩,沈大中. 有载分接开关电气机理[M]. 北京:中国电力出版社,2012:46-80.
- [4] 张德明. 真空分接开关技术的论述(1)[J]. 变压器,2011,48(8):54-56.
ZHANG Deming. Discussion on the technology of vacuum tap changer(1)[J]. Transformer, 2011, 48(8): 54-56.
- [5] 刘雪丽,李金忠,高飞,等. ± 800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5350-5356.
LIU Xueli, LI Jinzhong, GAO Fei, et al. Key technology research for vacuum type on-load tap-changer of ± 800 kV direct current converter transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.
- [6] 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 arc-less on-load voltage regulation for distribution transformer using high power electronic switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 97-102.
- [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] JIANG H, SHUTTLEWORTH R, AL ZAHAWI B A T, et al. Fast response GTO assisted novel tap changer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 111-115.
- [9] 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 arc-less on-load tap changer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4): 49-51.
- [10] 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 in-load tap-changing voltage for distribution transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 97-101.
- [11] ROGERS D J, GREEN T C. An active-shunt diverter for on-load tap changers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 649-657.
- [12] 姚欣,赵玉林,董守田,等. 基于 GTO 的无触点有载自动调压分接开关的研究[J]. 东北农业大学学报,2008,39(3):113-115.
YAO Xin, ZHAO Yulin, DONG Shoutian, et al. Research on automatic noncontact on-load tap change switch based on GTO[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(3): 113-115.
- [13] MOULI G R C, BAUER P, WIJEKOON T, et al. Design of a power-electronic-assisted OLTC for grid voltage regulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1086-1095.
- [14] 杨晓光,赵玉林. IGBT 作为变压器有载分接开关的研究[J]. 东北农业大学学报,2008,39(4):35-38.
YANG Xiaoguang, ZHAO Yulin. Study on transformer's on-load tap-changer based on IGBT[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(4): 35-38.
- [15] 盛况,郭清,张军明,等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报,2012,32(30):1-7.
SHENG Kuang, GUO Qing, ZHANG Junming, et al. Development and prospect of SiC power devices in power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 1-7.
- [16] 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.
- [17] 周翔,王丰华,傅坚,等. 基于混沌理论和 K-means 聚类的有载分接开关机械状态监测[J]. 中国电机工程学报,2015,35(6):1541-1548.
ZHOU Xiang, WANG Fenghua, FU Jian, et al. Mechanical condition monitoring of on-load tap changers based on chaos theory and K-means clustering method[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1541-1548.
- [18] LOPEZ J V, GARCIA S M, RODRIGUEZ J C C, et al. Electronic tap-changing stabilizers for medium-voltage lines optimum balanced circuit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 1909-1918.
- [19] 王鹏程,刘强. 一种新型吸收电路在光伏逆变器中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(10):112-116,120.
WANG Pengcheng, LIU Qiang. Application of new snubber circuit in photovoltaic inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 112-116, 120.
- [20] CHOE H J, CHUNG Y C, SUNG C H, et al. Passive snubber for reducing switching-power losses of an IGBT in a DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6332-6341.

(下转第 67 页 continued on page 67)

Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant

ZHOU Renjun, XIAO Junwen, TANG Xiafei, ZHENG Quanguo, LÜ Jia, CAO Junbo

(Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: The power-to-gas technology, as a new type of energy conversion and storage, provides a new way for renewable energy accommodation, and its required CO₂ for generating methane can be efficiently and economically got from the carbon collection amount of carbon capture units. The power-to-gas-carbon capture power plant is taken as a whole system, and its coordinated optimization model is built, which takes the carbon cost, fuel cost, abandoned wind cost and power-to-gas cost as the objectives, and the carbon capture rate, active power output of carbon capture power plant and power-to-gas active power as the decision variables. Simulative results show that, the power-to-gas-carbon capture power plant improves the wind power accommodation ability, reduces the carbon emission, improves the carbon utilization level, and reduces the power-to-gas operation cost.

Key words: power-to-gas; renewable energy accommodation; carbon capture; carbon utilization; optimal operation; costs; models

(上接第42页 continued from page 42)

[21] 毛鹏, 谢少军, 许泽刚. IGBT 模块的开关暂态模型及损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 40-47.

MAO Peng, XIE Shaojun, XU Zegang. Switching transients model and loss analysis of IGBT module[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(15): 40-47.

作者简介:

周念成(1969—),男,重庆人,教授,博士,从事电力系统



周念成

自动化、电能质量方面的教学和研究工作
(E-mail: cee_nczhou@cqu.edu.cn);

苏宇(1994—),女,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统自动化和电能质量(E-mail: 415397022@qq.com)。

Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer

ZHOU Niancheng¹, SU Yu¹, WANG Qianggang¹, GE Junkai², GAO Junqing³, ZHANG Jing³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Yuhang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Hangzhou Electric Power Company, Hangzhou 311100, China;

3. Zhejiang Truly Electric Co., Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: The structural characteristics of mechanical, hybrid and full-electronic OLTC (On-Load Tap Changer) for distribution transformer are compared, and then the OLTC circuit structure and control scheme are proposed based on IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) for distribution transformer. The parameter design methods of IGBT devices, transition circuit and absorption circuit of proposed OLTC are given, and the calculation formula of active power loss of proposed OLTC is deduced. The proposed OLTC scheme overcomes the shortcomings of mechanical OLTC, such as the slow operation, switching arcing, and can assist the distribution transformer to realize fast and non-arc on-load voltage regulation. The simulation model and experimental platform are built to test the voltage regulation performance of the proposed OLTC and analyze the influence of the switch parameters on the active power loss and IGBT tolerable current and voltage. The simulative, experimental and theoretical calculation results are compared to verify the effectiveness of the proposed IGBT scheme.

Key words: distribution transformer; on-load tap changer; Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBT); parameter design; active power loss

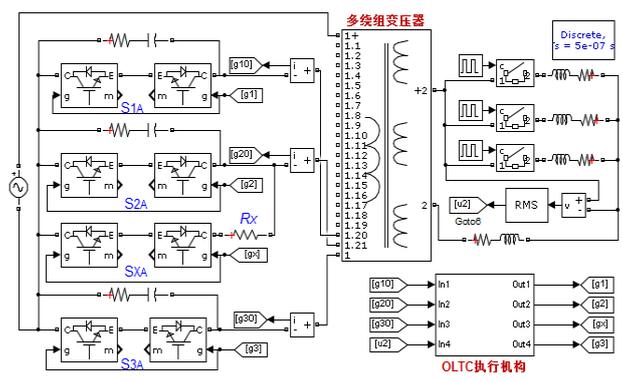


图 A1 单相 OLTC 的仿真模型

Fig. A1 Simulation model of single-phase OLTC