第 50 卷 第 2 期：478-490 高电压技术 Vol.50, No.2: 478-490
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221966

适配变压器全档位切换暂态分析的有载分接开关电路模型构建

司马文霞[1]，王大森[1]，杨　鸣[1]，李　刚[2]，厉　璇[3]，杨建琴[4]
（1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)，重庆 400044；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；3. 国网经济技术研究院有限公司，北京 102209；4. 上海华明电力设备制造有限公司，上海 200333）

摘　要：有载分接开关(on-load tap-changer，OLTC)是换流变压器的核心组件，其可靠切换过程关乎换流变的安全。然而目前国内在运特高压换流变用 OLTC 完全依赖进口，仿真获取 OLTC 不同运行状态的暂态特性数据是支撑 OLTC 关键电气参数设计与国产化制造的基础。经典的 OLTC 模型仅改变变压器变比或仅模拟单级档位切换过程，难以满足全档位电压调整与各级档位暂态特性数据同步获取的需求，导致 OLTC 设计优化、参数选型及故障分析缺乏足够的仿真数据支持。该文首先以真空 OLTC 为研究对象建立切换开关和极性开关等效电路模型，根据 OLTC 复杂的调压功能建立分层控制系统。其次，在 PSCAD 中搭建交流仿真系统，获取有载调压过程的暂态特性数据波形，与解析计算得到的电压和电流相比误差小于 0.2%，证明该模型满足 OLTC 电磁暂态仿真研究的精度要求。最后，开展循环调压仿真，获得负载电压数据与波形。结果表明：该文提出的 OLTC 模型能够接收外部控制信号，进行全档位调压与极性转换仿真分析，能够为 OLTC 的调压研究、故障溯源分析和过渡电阻设计选型等提供基础模型。

关键词：有载分接开关；极性开关；切换开关；恢复电压；承载电流

Construction of On-load Tap-changer Circuit Model for Transient Analysis of Transformer Full-range Switching

SIMA Wenxia[1], WANG Dasen[1], YANG Ming[1], LI Gang[2], LI Xuan[3], YANG Jianqin[4]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 4. Shanghai Humming Electric Equipment Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200333, China)

Abstract：On-load tap-changer (OLTC) is the core component of converter transformer, and its reliable switching process is related to the safety of converter. However, at present, OLTCs operated in ultra-high voltage converter transformers in domestic are completely dependent on imports. Obtaining transient characteristics data of OLTC in different operating states through simulation is the basis for supporting the design of key electrical parameters of OLTC and localization manufacturing. The classical OLTC models only change the transformer ratio or simulate the single-stage switching process, which is difficult to meet the requirements of voltage adjustment of full-range and synchronous acquisition of transient characteristics data of all taps, resulting in the lack of sufficient simulation data support for OLTC design optimization, parameter selection and fault analysis. In this paper, the equivalent circuit models of diverter switch and change-over selector were established based on vacuum OLTC, and the hierarchical control system was established according to the complex voltage regulation function of OLTC. Secondly, an AC simulation system was built in PSCAD to obtain the transient characteristic data waveform of on-load voltage regulation process. Compared with the analytical calculation of voltage and current, the error is less than 0.2%, which proves that the model meets the accuracy requirements of OLTC electromagnetic transient simulation research. Finally, the cyclic voltage regulation simulation was carried out to

基金资助项目：国家重点研发计划 (2021YFB2402100)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2402100).

obtain the load voltage data and waveform. The results show that the OLTC model proposed in this paper can receive external control signals and perform full-range voltage regulation and change-over simulation analysis, which can provide a basic model for OLTC voltage regulation research, fault tracing analysis and transition resistance design and selection.

Key words：on-load tap-changer; change-over selector; diverter switch; recovery voltages; carrying current

0　引言

有载分接开关(on-load tap-changer，OLTC)是变压器类装备的核心组件[1-3]，能稳定系统电压、改善电能质量[2]并提升现有电力系统对新能源接纳能力。OLTC 设计与优化、参数选型及故障分析等都依赖于 OLTC 切换中的电磁暂态特性，如触头恢复电压、承载电流等特性。然而，解析计算难以获取多种工况下 OLTC 与直流系统联合运行的暂态特性数据。因此，构建适配变压器全档位切换暂态分析的 OLTC 电路模型具有重要意义和工程价值。

在高压直流输电系统中，OLTC 调压范围大，为系统电压的 20%~30%[4]；调压档距小，为额定电压的 1%~2%[4-5]；分接档位多，极性转换频繁[6-7]；OLTC 切换故障约占变压器故障的 20%以上[8]，切换故障较多[9-11]。因此在直流输电系统电磁暂态仿真中，OLTC 模型需具备全档位和极性转换暂态特性分析能力。

PSCAD、MATLAB Simulink 等仿真软件中，有载调压变压器模型通过改变变比参数实现全档位电压调整目标，该模型有载调压控制简单，分接档位全、调压范围大。但该模型存在以下问题：1）模型改变变压器变比参数[12]，仅能获取端口电压电流数据，无法表征档位切换的暂态特性，不具备获取 OLTC 各触头恢复电压与承载电流数据的能力；2）极性转换期间，调压绕组与主绕组的连接方式发生改变[13]，模型仅能获取档位调整的变压器端口数据，难以满足极性转换过程电磁暂稳态特性的仿真需求。西班牙奥维耶多大学研究团队基于变压器的 π 模型，设置标称绕组与调压绕组阻抗的标幺值之比，改进了含分接开关变压器模型[12,14]，提升了稳态电压仿真精度，但该模型没有物理接口，无法获取各触头的电压、电流数据及波形。

为获取档位切换过程中的电磁暂态特性，有研究提出基于时控开关或逻辑门控制的 OLTC 电路模型。此类模型采用时控开关模拟切换开关的触头通断，获取各触头的电压、电流[15-17]数据。然而，该模型仅适用于特定分接档位与切换时刻的仿真研究。为增强模型多档位暂态特性研究能力，可采用 PSCAD 内置的单相四绕组全耦合变压器模型，建立具有 3 个分接档位的仿真模型。但此模型不具备适配输电系统必需的全档位(例如陕武直流输电工程中 OLTC 具有 31 个分接档位)调压分析能力[18]，且基于时控开关的仿真模型无法接收输电系统的调压控制信号，难以与直流系统进行联合仿真。以接收系统控制信号、增强电路模型的逻辑控制能力为目标，阿尔斯通的研究人员引入逻辑门电路，设置 2 个切换开关模型，模拟档位切换过程，提出具备 3 个分接档位的模型[19]。该模型可以接收系统的调压控制信号进而启动调压过程。然而此类模型仍具有以下问题：1）全档位 OLTC 电路模型的逻辑门元件多、电路复杂且采用双冗余度设计[19]，增大了控制系统复杂程度；2）逻辑门控制扩展性不佳，增减分接档位可能导致控制失效；3）极性开关能够改变调压绕组电流方向，因此同一分接选择器触头对应 2 个分接档位，导致控制系统元件使用量和复杂程度成倍增加。为进一步研究极性开关的暂态特性，加拿大学者采用单刀双掷开关模型模拟极性转换[13]。然而该模型缺乏与切换开关模型的配合，无法模拟极性开关真实工作过程，难以获取极性转换过程的暂态特性。综上，现有的 OLTC 模型均难以实现变压器的全档位切换暂态过程分析，且缺乏表征极性转换完整切换过程的能力。

为实现 OLTC 全档位切换与极性转换电磁暂态过程的分析，本文提出了一种适配变压器全档位切换暂态分析及极性转换研究的 OLTC 模型构建方法。以中国电力科学研究院有限公司提出的真空 OLTC 过渡电路[20]为研究对象，建立具有 17 个(可任意扩展)切换开关电路模型的模型阵列及极性开关电路模型；建立了分层[21-24]立体控制系统，触发层生成各触头控制信号，分配层主要实现切换开关阵列 274 个控制信号的转移分配；在电磁暂态仿真分析软件 PSCAD/EMTDC 中搭建 500 kV 仿真系统，获取切换开关各触头电压、电流、变压器负载电压等数据，并与解析结果对比，验证电路模型的准确性；基于建立的全档位 OLTC 模型，获取不同工况

下 OLTC 各触头电压、电流数据及直流输电系统的电流数据。为 OLTC 全档位切换暂态分析、过渡电阻设计选型和试验考核、故障溯源等提供模型支撑。

1 有载分接开关建模原理

1.1 有载分接开关电气结构

OLTC 能够改变变压器有效匝数，调节系统电压。变压器端口电压与绕组匝数关系如式(1)所示。其中 U_1 为变压器原边电压，U_2 为变压器副边电压，n_1 为变压器原边绕组有效匝数，n_2 为变压器副边绕组有效匝数。有载调压过程中，U_1 与 n_2 不变，OLTC 改变 n_1，导致 U_2 变化，实现调节变压器副边电压的目标。

$$U_2 = \frac{U_1 \times n_2}{n_1} \tag{1}$$

OLTC 主要由极性开关、分接选择器及切换开关构成，见图 1(其中 K 为与变压器连接的静触头)。极性开关动触头与变压器主绕组相连，静触头分别与调压绕组两端的极限位置分接抽头连接。分接选择器静触头组和动触头组分别与调压绕组及切换开关紧密连接。

1.2 全档位有载分接开关建模原理

本文从电路模型与控制系统两个方面入手，建立适配全档位切换暂态分析的 OLTC 模型，如图 2 所示(图中 MC1 与 MC2 为主触头，V3 为主通断真空触头，V1 与 V2 为过渡真空触头，G1 与 G2 为隔离触头，Z1 与 Z2 为辅助触头，R 为过渡电阻[20])。电路部分包括切换开关与极性开关等效电路。首先，基于真空 OLTC 切换开关拓扑结构建立切换开关等效电路；其次，构建切换开关电路模型阵列，使任意相邻分接档位间均通过切换开关电路模型连接；最后，建立极性开关等效电路，完成极性开关动静触头与切换开关电路模型阵列的整合。

控制系统是 OLTC 电路模型实现全档位切换的核心，主要完成切换开关模型阵列时序信号的生成与分配。控制信号生成系统接收输电系统调压信号，输出切换开关各触头控制信号。控制信号分配系统接收输电系统调压信号，将各触头控制信号分配给工作档位与目标分接档位间的切换开关，并完成切换开关电路模型阵列其余各触头控制信号的设置与分发。

2 有载分接开关模型构建

2.1 有载分接开关电路模型构建

2.1.1 切换开关触头任务分析

以中国电力科学研究院有限公司提出的真空 OLTC 过渡电路(如图 3)为研究对象，其切换开关由

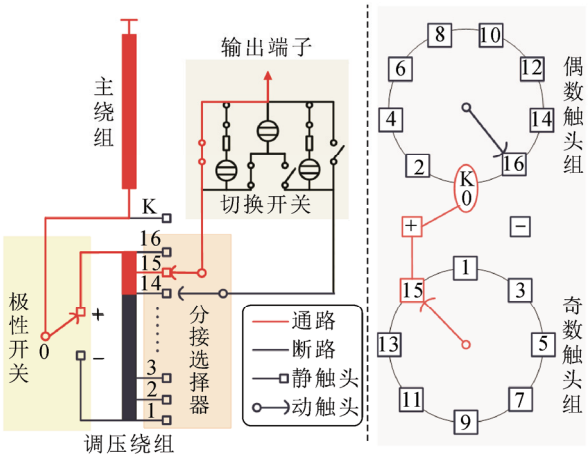


图 1 有载分接开关电气原理

Fig.1 Electrical schematic diagram of OLTC

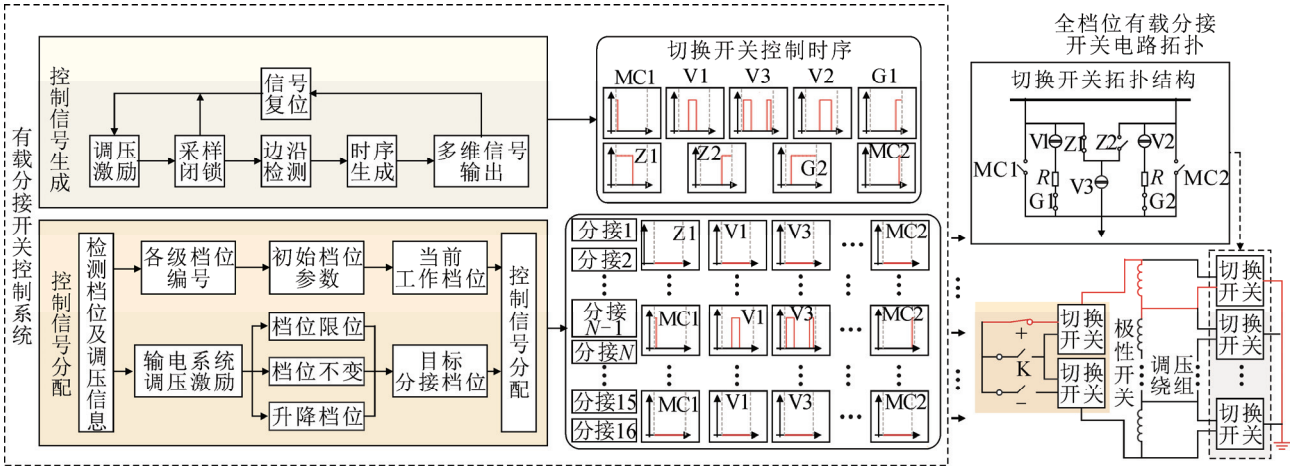


图 2 全档位有载分接开关建模框架

Fig.2 Full-range on-load tap changers model architecture

真空触头、隔离触头、辅助触头、过渡电阻等构成。

以真空 OLTC 从档位 N 到档位 N+1 为例，其主要变换步骤如图 A1 所示。根据切换开关变换过程，获取等效电路图，分别列写 KCL 与 KVL 电路方程，即可获取各触头恢复电压与承载电流解析表达式(解析结果见附录 A)。

基于真空 OLTC 过渡电路建立切换开关等效电路如图 4，由于两分接抽头间的杂散电抗很小，可忽略不计[11]，因此不需考虑抽头间杂散参数。此外，本文以 15 个切换开关等效电路模型构成模型阵列，实现任意相邻分接档位间均由切换开关模型转移负载电流的目标。

尽管分接选择器起到连接切换开关与调压绕组的作用，但分接选择器各抽头不具备通断电流的能力，完全依赖切换开关转移负载电流。因此，本文将分接选择器各抽头融合到切换开关模型阵列中，重点研究切换开关的暂态特性。

2.1.2　极性转换暂态特性分析

极性开关能够改变调压绕组的电流方向，在不增加变压器绕组与抽头的情况下，通过极性转换扩大分接范围[10]。极性转换需切换开关完成图 B1(Ⅰ)到图 B1(Ⅱ)与图 B1(Ⅲ)到图 B1(Ⅳ)两次负载电流转移。以图 B1(Ⅰ)到图 B1(Ⅱ)为例，切换开关具有如图 A1 所示的变换过程，因此基于图 B1 与图 A1 进行电路解析，推导获取变压器二次侧电压。

切换开关处于图 A1(d)、图 A1(f)及图 A1(g)阶段，负载电压为：

$$\boldsymbol{U}_2=\frac{\boldsymbol{U}_1-\boldsymbol{I}R}{k} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{U}_1$ 和 $\boldsymbol{U}_2$ 分别为变压器一、二次侧对地电压；$\boldsymbol{I}$ 为负载电流；R 为过渡电阻；k 为变压器高压侧与低压侧的匝数比。

切换开关处于图 A1(e)状态，则可得负载电压 $\boldsymbol{U}_2$ 为：

$$\boldsymbol{U}_2=\frac{\boldsymbol{U}_1-\frac{1}{2}(\boldsymbol{I}R+\boldsymbol{U}_S)}{k} \tag{3}$$

切换开关处于图 A1 其余工作步骤时，负载电压为：

$$\boldsymbol{U}_2=\frac{\boldsymbol{U}_1}{k} \tag{4}$$

2.2　有载分接开关控制系统

2.2.1　控制信号生成系统

OLTC 控制信号生成流程如图 5，以升压、降压或不调压为分接档位调整目标，并转换为+1、−1 和 0 的模拟信号。获取该信号的模值，输出高电平(调压)与低电平(不调压)构成的模值方波信号。

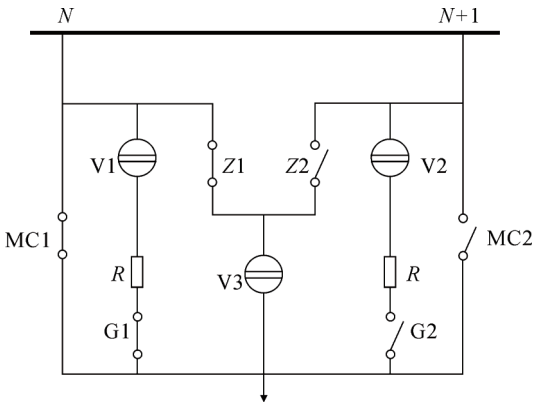


图 3　真空有载分接开关拓扑结构

Fig.3　Topology of vacuum OLTC

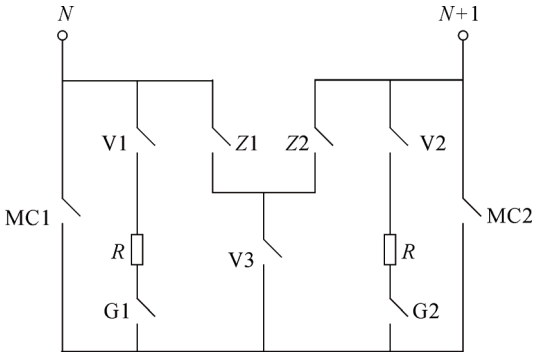


图 4　切换开关等效电路

Fig.4　Equivalent circuit of diverter switch

模值方波信号经调制处理后，输出适配边缘检测的幅度调制信号到边缘检测元件。调压需求出现时，幅度调制信号为窄脉冲。以窄脉冲上升沿为计时起点，延时生成不同宽度的方波信号，构成切换开关各触头的控制信号。

OLTC 调压周期较长，窄脉冲信号频率较高，检测元件可能会重复获取脉冲上升沿，导致无法生成目标方波。因此，设置闭锁模块，确保生成各触头控制信号。本文采用线性调制的技术方案，以边缘检测获取的上升沿为计时起点，以切换开关工作周期为信号宽度，输出闭锁控制信号，与用于幅度调制的载波信号进行线性调制。单级调压结束后，恢复切换开关各触头控制信号至初始状态，准备开启下次的切换过程。

2.2.2　控制信号分配系统

分接档位与分接选择器触头标号对应关系是控制信号分配系统建立的基础。线性调 OLTC，分

接档位与分接选择器触头标号具有精确对应关系。然而正反调 OLTC 调压绕组极性改变后，同一分接抽头对应的分接档位改变，导致分接档位约为分接选择器触头数的 2 倍。因此，正反调 OLTC 同一分接抽头不同极性接入时，分接档位不同，OLTC 档位编号与分接选择器触头组标号不再相同。正反调 OLTC 的分接档位可分为正调阶段和反调阶段，则建立式(5)所示的分接档位与分接选择器触头组编号对应关系。

$$N_{\mathrm{S}}=\begin{cases}N_{\mathrm{tap}}, & (N_{\mathrm{tap}}\le N_{\mathrm{num}},+)\\ K_{\mathrm{a}}, & (N_{\mathrm{tap}}=N_{\mathrm{num}},+)\\ 1, & (N_{\mathrm{tap}}=N_{\mathrm{num}},-)\\ N_{\mathrm{tap}}+1-N_{\mathrm{num}}, & (N_{\mathrm{tap}}>N_{\mathrm{num}},-)\end{cases} \tag{5}$$

式中：N_{tap}、N_{S}、N_{num}、K_{a} 分别为分接档位编号、分接选择器触头标号、分接抽头总数、极性开关分接档位。此外，“+”表示 OLTC 正调阶段，“–”表示 OLTC 反调阶段。

1）正调阶段：分接档位编号和分接选择器触头标号一致。

2）反调阶段：第 1 分接抽头载流与第 K_a 分接抽头载流负载电压相同，因此将反调阶段第 1 分接抽头设为第 N_{num} 分接档位。其余分接抽头编号为分接档位编号加 1 并减去分接抽头数目。

3）极性反转阶段：分接档位与极性开关的档位一致，具体数据由调压方向决定。

控制信号分配设计框图如图 6，OLTC 控制系统具有升、降档调节、档位限位、档位保持等控制功能。

目标分接档位 N_{d} 满足式(6)时，OLTC 档位运动允许进行。其中 N_{min} 与 N_{max} 分别为最小和最大分接档位编号。

$$N_{\mathrm{min}}\le N_{\mathrm{d}}\le N_{\mathrm{max}} \tag{6}$$

1）升档位：检测到模拟信号 S 为+1 时，升档位启动，分配系统以 N_{d} 分接档位为 MC2 主触头，以 N_{d}–1 档位为 MC1 主触头，传递触头控制信号至 N_{d} 与 N_{d}–1 档位之间的切换开关模型。分配系统将其余切换开关模型控制信号置 0。

2）降档位：检测到模拟信号 S 为−1 时，降档位启动，降档控制和升档控制的信号分配类似，区

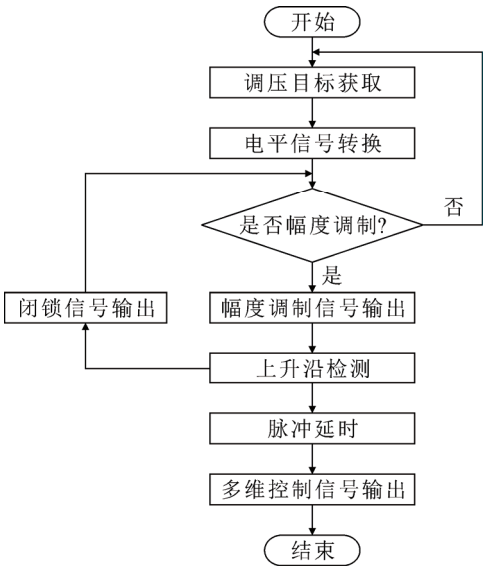


图 5 控制信号触发流程

Fig.5 Triggering flow of control signals

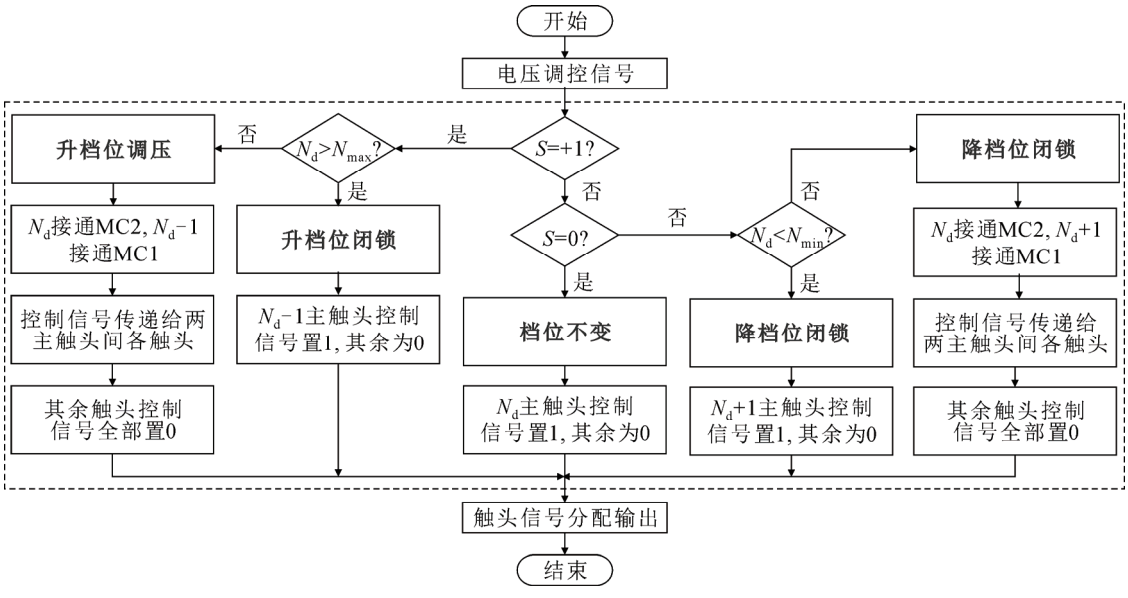


图 6 控制信号分配程序框图

Fig.6 Control signal distribution program block diagram

别是需将 N_d+1 档位主触头视为 MC1，N_d 档位主触头视为 MC2。

3）不进行档位切换：检测到模拟信号 S 为 0 时，OLTC 载流档位不变，仍需保持 N_d 档位闭合载流，其余开关保持断开。

4）档位限位：档位 N_d 不满足式(6)时，OLTC 模型全部触头控制信号被置 0，OLTC 模型全部触头断开，导致负载电压剧烈降低，因此需进行限位控制。

3　有载分接开关仿真性能测试与分析

本文针对 OLTC 应用于变压器/换流变开展仿真研究，仿真基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC[15]。如表 1 所示，完成了交直流系统不同运行工况的仿真测试。通过交流系统单级调压仿真，校验 OLTC 模型的精度；通过交流系统循环调压仿真，校验了 OLTC 电路模型与工程一致的调压能力，证明了模型的先进性。

搭建如图 7(a)所示仿真系统，其参数设置如表 2 所示。假设系统波动导致负载电压降低，需升高负载电压(即增加分接档位)。本文设置 OLTC 电路模型在 0.70 s 启动第 26 到第 27 档的有载调压，获取各触头恢复电压和承载电流数据，并与解析数据对比。其中：HV、LV 和 RV 分别为高压绕组、低压绕组和调压绕组；P+Q 为系统负载。

3.1　单级调压测试

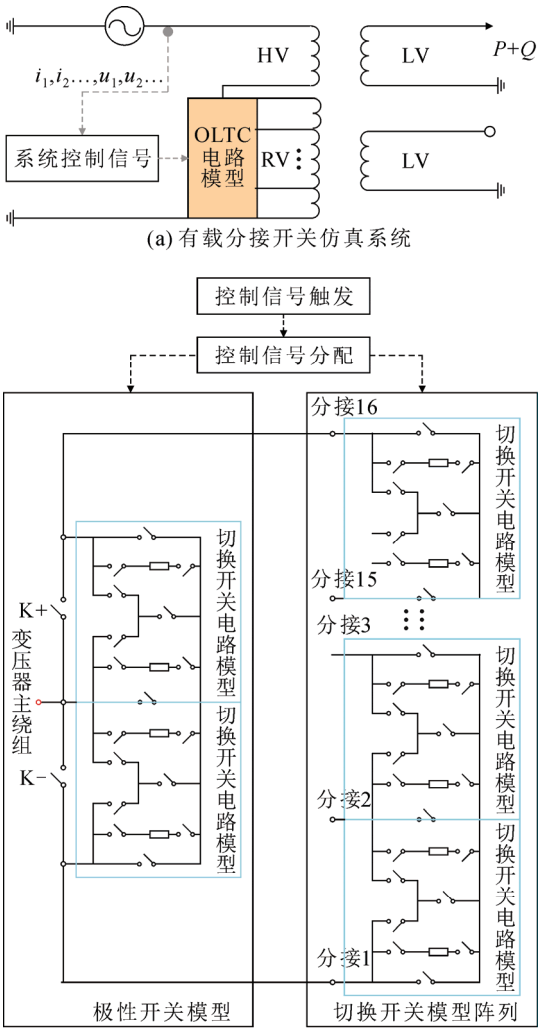
3.1.1　负载电压波形

采用 PSCAD 内置的 OLTC 仿真模型，与建立的 OLTC 电路模型对比。分别获取两模型的负载电压及其有效值波形如图 8(各触头通断时间与附录 A 相同，各阶段的时间设置与含义见附录 C)。由图 8(a)可知，调压前负载电压均为 110.08 kV。OLTC 模型 0.70 s 开始切换，两模型分别经 0.02 s 和 0.08 s 完成档位切换。切换后负载电压均为 112.08 kV。然而，PSCAD 内置 OLTC 模型无法更改切换周期，也无法获取各触头恢复电压与承载电流的数据。因此，该模型无法表征有载切换各触头的暂态特性，不能研究分析有载调压的时序演变规律。由图 8(b)及图 A1 知，在 t_7 期间，OLTC 模型 V2 闭合，过渡电阻分压，变压器原边绕组电压减小，导致负载电压峰值减小 0.91 kV。由图 A1 知，t_4 到 t_7 期间，切换开关等效电阻分别为 R、0.5R 及 R，因此负载电压呈现先减小后增加的趋势。t_8 期间 V2 断开，切换开关等效电阻为 0，负载电压峰值升高至 158.43 kV。该 OLTC 模型获取的负载电压波形与文献[25-26]相似，证明模型负载电压分析的正确性。

表 1　仿真工况

Table 1　Simulation on operating conditions

测试工况	目的
交流输电单级调压	验证模型具备电压调整能力。
交流输电循环调压	验证模型能够实现全档位调压仿真。
变压器直流偏磁工况调压	以直流偏磁为例，证明模型能获取不同运行状态下的暂态数据。
标准直流系统调压	验证模型能够与直流系统耦合仿真。



(a) 有载分接开关仿真系统

(b) 有载分接开关模型

图 7　有载分接开关仿真系统

Fig.7　Simulation model of OLTC

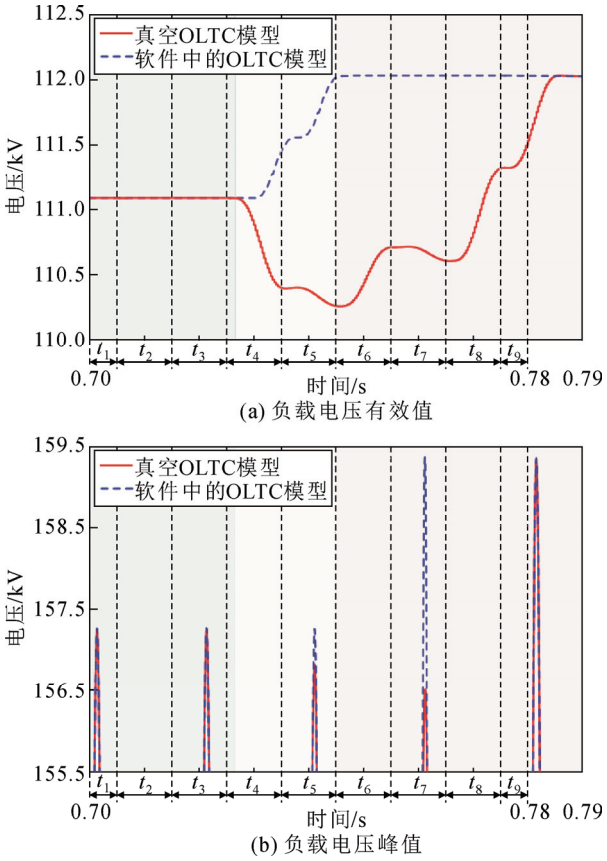
3.1.2　触头恢复电压波形

获取 OLTC 电路模型各触头恢复电压仿真数据，依据附录 A 中触头恢复电压表达式，获取各触头恢复电压解析数据，绘制各触头恢复电压解析波

表 2 测试系统模型参数

Table 2 Parameter of simulation model.

参数	数值	参数	数值
电源电压/kV	480	负载有功/MW	400
变压器数量/台	1	负载无功/MVar	10
变压器容量/MVA	500	过渡电阻/Ω	4.3
变压器一次侧电压/kV	480	初始分接档位	26
变压器二次侧电压/kV	112	分接档位数	31
绕组级电压/kV	4.20	极性开关有无	有
级电压百分比/%	0.87	分接选择器触头数	16

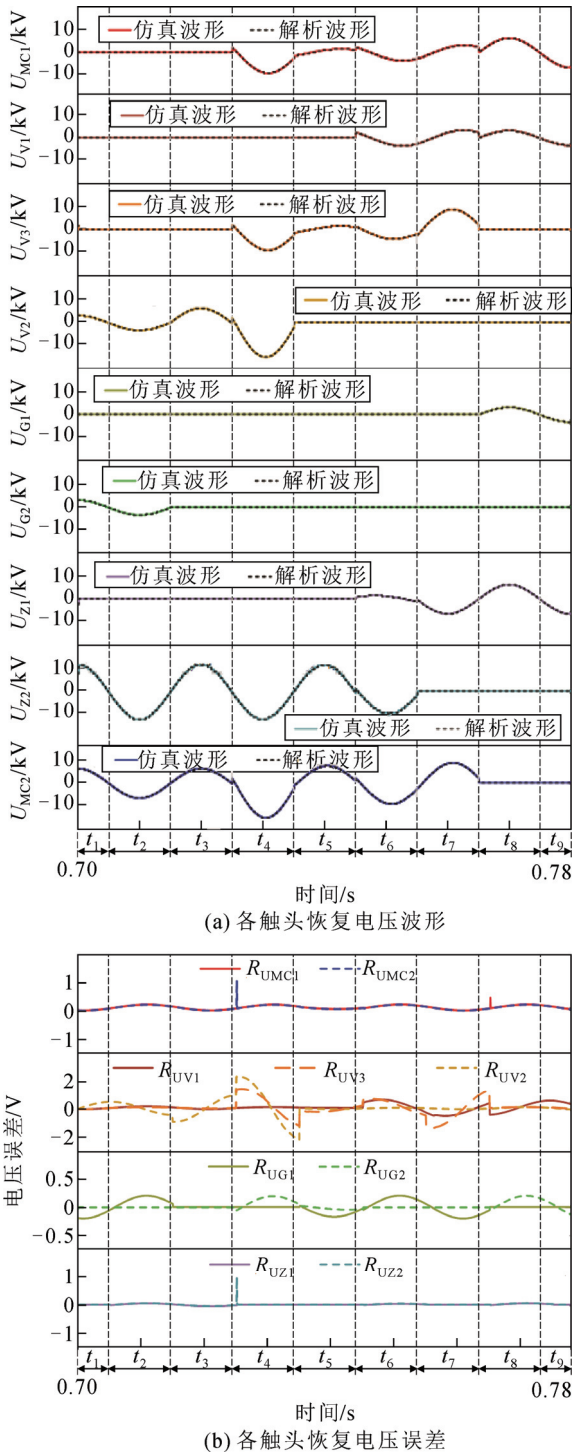


(a) 负载电压有效值

(b) 负载电压峰值

图 8 负载电压波形对比

Fig.8 Load voltage waveform comparison



(a) 各触头恢复电压波形

(b) 各触头恢复电压误差

图 9 各触头恢复电压

Fig.9 Recovery voltages of each contact

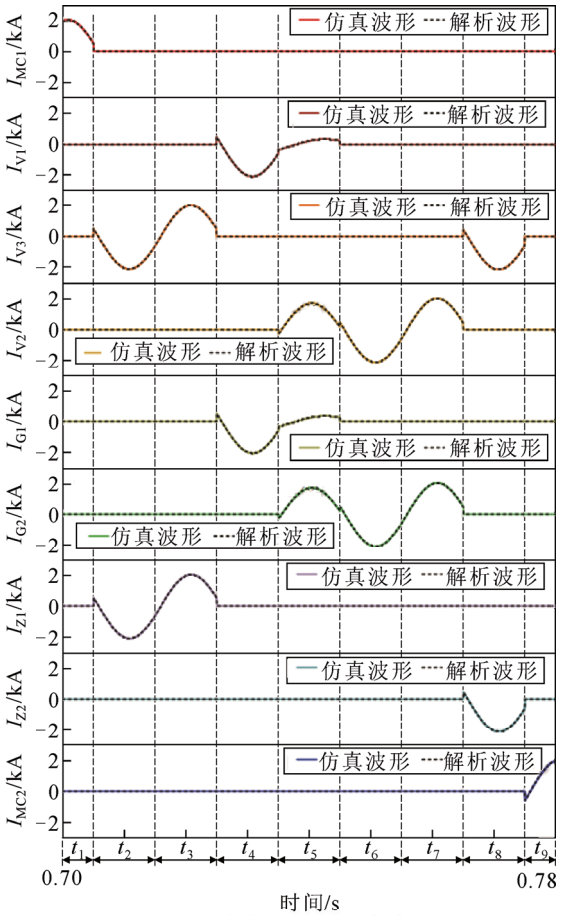
形与仿真波形如图 9(a)。由图 9(a)可知，各触头恢复电压仿真波形与解析波形高度重合。

以触头恢复电压解析值为真值，各触头恢复电压仿真数据为测量值，计算各触头恢复电压误差，获取如图 9(b)所示触头恢复电压误差波形。结果表明：OLTC 电路模型触头恢复电压仿真数据与解析值的误差不超过 3.00 V(其中过渡真空触头 V2 恢复电压误差最大，为 2.57 V)，各触头恢复电压相对误差均在 0.1%以内，可忽略不计，验证了建立的 OLTC 电路模型分析各触头恢复电压的正确性。

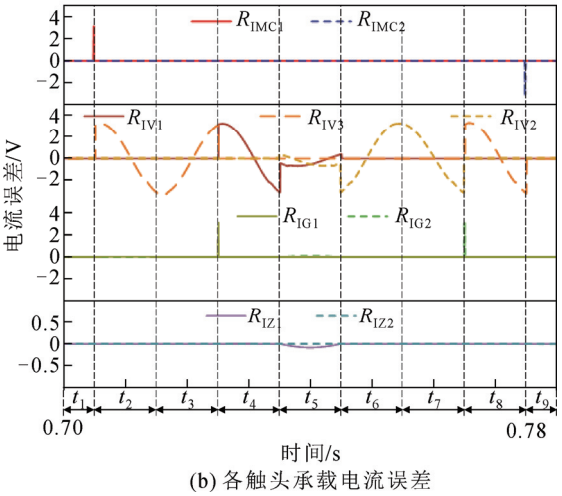
3.1.3 切换开关触头承载电流波形

获取 OLTC 模型 26 档向 27 档有载切换过程中各触头承载电流仿真数据。依据附录 A 中各触头承载电流的解析表达式，获取触头承载电流解析数据。绘制各触头承载电流解析波形与仿真波形如图 10(a)。结果表明：切换过程中触头承载电流仿真波形与解析波形高度重合。

以触头承载电流解析值为真值，各触头承载电流仿真数据为测量值，计算各触头承载电流误差如图 10(b)所示。触头承载电流误差波形表明：误差不超过 4 A(V3 与 V2 的承载电流误差最大，为 3.36 A)，触头承载电流相对误差均不超过 0.2%，可忽略不计。验证本文 OLTC 模型分析各触头承载电流的正确性。



(a) 各触头承载电流波形



(b) 各触头承载电流误差

图 10　各触头承载电流波形

Fig.10　Carrying current of each contact

3.2　有载分接开关模型调压能力测试分析

3.2.1　极性转换仿真

由文献[13]可知，调压绕组电流方向改变前后，变压器二次侧电压幅值不变。依据第 2 章推导的极性转换负载电压表达式可知，极性转换期间负载电压波形与图 8 相似。本文解析获取极性转换期间负载电压，绘制负载电压解析波形与仿真波形如图 11，其中：t_4、t_5、t_6 与 t_7 与附录 C 中的时间设置相同。V1 或 V2 闭合期间，切换开关等效电阻分别为 R、$0.5R$ 及 R，导致变压器原边电压改变，因此负载电压有效值变化。然而极性反转阶段，切换前后无法改变变压器绕组匝数，因此正反调前后负载电压有效值相同。仿真结果表明：负载电压仿真数据误差小于 5 V，相对误差小于 0.05%，可忽略不计。

3.2.2　循环调压仿真

为验证电路模型的全档位调压能力，基于建立的 500 kV 仿真系统，设置 OLTC 电路模型进行循环调压。仿真获取图 12 所示负载电压有效值波形(本文研究 OLTC 的调压能力，不分析过渡电阻产热，因此忽略 20 s 的切换间隔)。

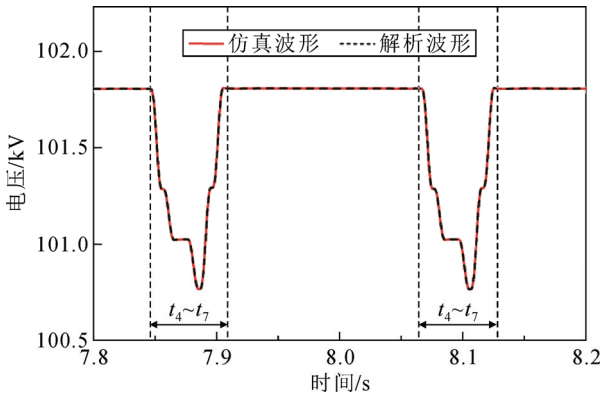


图 11　极性转换电压有效值

Fig.11　Voltage during change-over operation

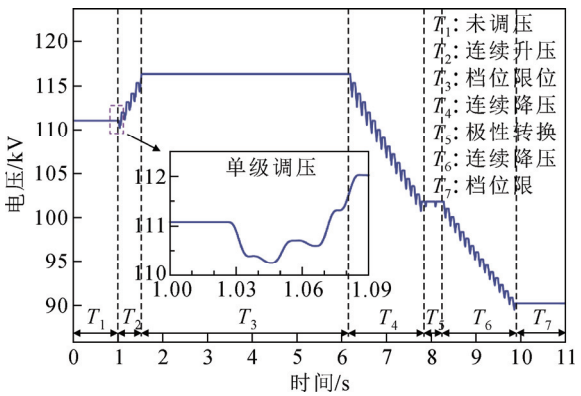


图 12　循环调压电压波形

Fig.12　Cyclic regulation voltage

1）连续升压(1.00~1.50 s)：分接档位由 26 档升至 31 档(26 档到 27 档调压期间，负载电压与图 8 一致)，证明了建立的 OLTC 电路模型具备连续升压调整的能力。

2）连续降压(6.00~7.80 s；8.20~9.90 s)：由档位 31 减小至档位 1，负载电压降低，证明了建立的 OLTC 电路模型具备连续降压调整能力。

3）极性转换(7.80~8.20 s)：极性转换前后负载电压相同，证明了 OLTC 电路模型能够实现极性开关与切换开关匹配切换的目标。

4）档位限位(1.50~6.00 s；9.90~11.00 s)：OLTC 调整到极限档位，档位限位启动，负载电压不变，证明 OLTC 电路模型的档位限位能力。

3.3 直流偏磁工况下有载调压仿真

3.3.1 直流偏磁仿真系统

基于 OLTC 测试系统(如图 7，其参数如表 2)，建立直流偏磁仿真系统如图 13。其中，三相变压器星接，变压器高压侧均配备 OLTC 电路模型。以直流电压源为激励，模拟两变电站间的地表电位差。该三相仿真系统中，直流电压为 5.00 V，偏置电流为 10.04 A。

3.3.2 直流偏磁工况下触头恢复电压与承载电流

直流偏磁工况下，OLTC 模型完成 26 档到 31 档调压(调压时间：6.70~7.20 s)。本文获取的 OLTC 模型由 26 档向 27 档有载调压过程中，各触头恢复电压及承载电流仿真数据(如图 14)与系统正常运行状态下 OLTC 切换仿真数据(3.1 节中图 9 与图 10)对比。结果表明：直流偏磁工况下，触头恢复电压波形与图 9 高度相似，触头承载电流波形与图 10 高度相似。

由图 15 可知，OLTC 连续调压时，偏置电流持续减小；调压结束则偏置电流逐渐增大。OLTC 模型 26 档向 27 档调压过程(6.70~6.78 s)，过渡电阻接入电路(等效为中性点串电阻[27])，中性点电流减小；切换完成后，主触头载流(等效为中性点直接接地)，中性点电流增加。

3.4 直流系统有载调压仿真

建立 CIGRE HVDC benchmark 模型，将整流侧换流变拆分为 6 个单相变压器，并以其中一相作为研究对象，设置 OLTC 模型完成 26 档向 27 档的单级调压。

获取 OLTC 模型触头恢复电压与承载电流波形如图 16。结果表明：各触头恢复电压与承载电流和

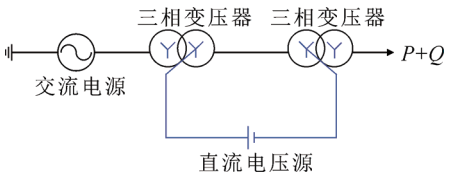
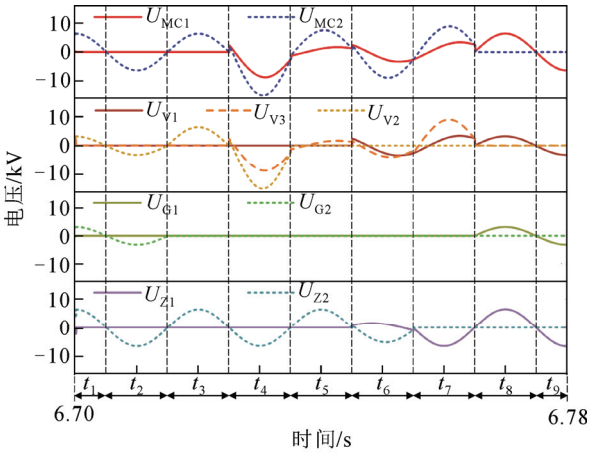
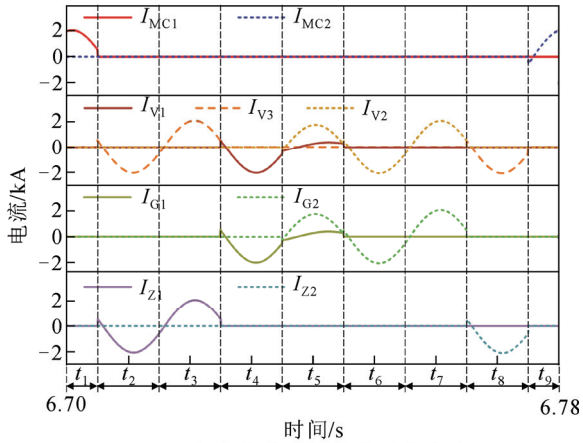


图 13 直流偏磁仿真电路

Fig.13 DC bias simulation circuit



(b) 直流偏磁工况触头恢复电压



(b) 直流偏磁工况触头承载电流

图 14 直流偏磁工况下触头恢复电压与承载电流

Fig.14 Recovery voltage and carrying current under DC bias

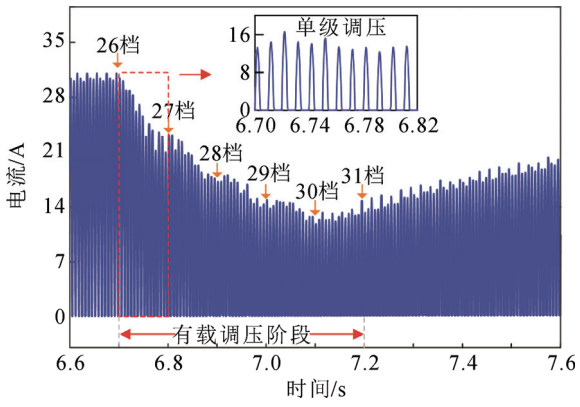
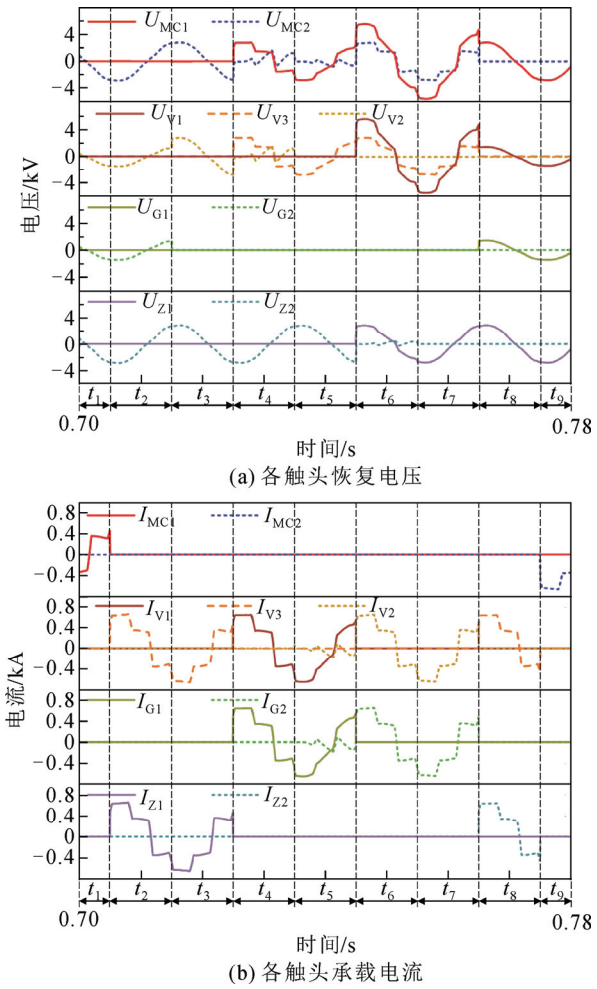


图 15 变压器中性点电流波形

Fig.15 Neutral current of power transformer



(a) 各触头恢复电压

(b) 各触头承载电流

图 16　直流系统中各触头恢复电压与承载电流

Fig.16　Recovery voltage and carrying current of each contact in DC system

文献[28]的解析计算结果一致，验证了仿真结果的正确性。由各触头恢复电压波形可知：过渡真空触头 V1 恢复电压最大，为 5.69 kV。因此，直流系统有载调压过程，过渡真空触头(包括 V1 与 V2)承受较大的恢复电压。

4　结论

1）针对 OLTC 全档位切换暂态分析电路模型缺乏的问题，本文提出了基于 OLTC 切换开关电路拓扑、极性转换原理及分接档位与分接选择器抽头编号对应关系，建立等效电路模型、控制信号生成与分配系统的建模方法。

2）本文基于中国电科院提出的真空 OLTC 过渡电路，建立适配全档位切换暂态分析的 OLTC 电路模型，通过单级调压测试、OLTC 模型调压能力测试分析验证了本文建立模型的准确性与先进性，证明了模型具备循环调压、极性转换及档位限位调压能力。

3）本文将建立的 OLTC 电路模型应用于变压器直流偏磁及与标准直流系统联合仿真，获取 2 种工况下的电压、电流数据，证明 OLTC 电路模型能够应用于不同工况的有载调压仿真研究。

综上，本文提出了适配全档位切换暂态分析的 OLTC 电路模型构建方法，能够获取档位切换暂态数据，为 OLTC 国产化设计改进与优化、过渡电阻参数选型及分接开关故障分析等提供基础模型和关键数据。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] LI C H, LI K, MA C H, et al. Flexible control strategy for HVDC transmission system adapted to intermittent new energy delivery[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(4): 425-433.

[2] 宋冬冬，丁来伟，董　彪，等. 机械式有载分接开关改进方案的设计与研究[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2141-2149.
SONG Dongdong, DING Laiwei, DONG Biao, et al. Design and research on the improvement scheme of purely mechanical on-load tap-changers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2141-2149.

[3] POMPODAKIS E E, KRYONIDIS G C, ALEXIADIS M C. OLTC transformer model connecting 3-wire MV with 4-wire multigrounded LV networks[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 192: 107003.

[4] 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 convertor transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5350-5356.

[5] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2011.
ZHAO Wanjun. HVDC transmission engineering technology[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2011.

[6] 郭贤珊，李凤祁，阮思烨，等. 高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J]. 电力建设，2021，42(2)：9-19.
GUO Xianshan, LI Fengqi, RUAN Siye, et al. Optimization on control strategy of tap changer in HVDC converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 9-19.

[7] 田　阳，李志兵，田　宇，等. 超/特高压分接开关切换试验保护用大容量快速真空开断装置研制[J]. 高电压技术，2022，48(7)：2616-2624.
TIAN Yang, LI Zhibing, TIAN Yu, et al. Development of large capacity and fast vacuum breaking device for switching test protection of UHV/EHV tap changer[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2616-2624.

[8] 王丰华，曾全昊，郑一鸣，等. 基于 Bayes 估计相空间融合和 CM-SVDD 的有载分接开关机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报，2020，40(1)：358-368.
WANG Fenghua, ZENG Quanhao, ZHENG Yiming, et al. A mechanical fault diagnosis of on-load tap-changers based on phase space fusion of Bayes estimation and CM-SVDD[J]. Proceedings of the

CSEE, 2020, 40(1): 358-368.
[9] AL-AMERI S M, ALMUTAIRI A, KAMARUDIN M S, et al. Application of frequency response analysis technique to detect transformer tap changer faults[J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3128.
[10] SHANG R Y, PENG C Q, SHAO P F, et al. FFT-based equal-integral-bandwidth feature extraction of vibration signal of OLTC[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(3): 1966-1980.
[11] 沈大中，KRAEMER A，DOHNAL D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 南方电网技术，2011，5(1)：25-28.
SHEN Dazhong, KRAEMER A, DOHNAL D. Application of vacuum on-load tap-changers in HVDC converter transformers[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 25-28.
[12] MOJUMDAR M R R, CANO J M, ORCAJO G A. Estimation of impedance ratio parameters for consistent modeling of tap-changing transformers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3282-3292.
[13] BABAEI A, ZIOMEK W, GOLE A M. Transient characteristics of on-load tap changers during change-over operation[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 197: 107296.
[14] CANO J M, MOJUMDAR M R R, ORCAJO G A. Reconciling tap-changing transformer models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2266-2268.
[15] 雷园园，赵林杰，彭在兴，等. 换流变压器有载分接开关切换过程仿真及选型技术[J]. 南方电网技术，2018，12(7)：14-19.
LEI Yuanyuan, ZHAO Linjie, PENG Zaixing, et al. Switching process simulation and type-selection technology of on-load tap changer of converter transformer[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 14-19.
[16] BAO L W, YUAN Y, LEI Y Y, et al. Simulation and experimental study of switching transient process of on-load tap changer of converter transformer[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.
[17] SADEGHI R, SAMET H, GHANBARI T, et al. Considering the tap-changing modifications in protection of EAF transformers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129: 106857.
[18] MOHADDES M, AN T, LU J J, et al. Innovative compensation methods for large voltage drop effects in very long HVDC transmission systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 1-8.
[19] OATES C, BARLOW A, LEVI V. Tap changer for distributed power[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications. Aalborg, Denmark: IEEE, 2007: 1-9.
[20] 李 鹏，李金忠，汪 可，等. 一种带隔离触头的真空有载分接开关过渡电路及调压方法：111986902A[P]. 2020-11-24.
LI Peng, LI Jinzhong, WANG Ke, et al. The utility model relates to a vacuum on-load tap switch transition circuit with an isolating contact and a voltage regulation method: 111986902A[P]. 2020-11-24.
[21] ZHANG Z F, DA SILVA F F, GUO Y F, et al. Double-layer stochastic model predictive voltage control in active distribution networks with high penetration of renewables[J]. Applied Energy, 2021, 302: 117530.
[22] TANG Z Y, HILL D J, LIU T. Distributed coordinated reactive power control for voltage regulation in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 312-323.
[23] SUN X Z, QIU J. Hierarchical voltage control strategy in distribution networks considering customized charging navigation of electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4752-4764.
[24] CHOEUM D, CHOI D H. Vulnerability assessment of conservation voltage reduction to load redistribution attack in unbalanced active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1): 473-483.
[25] FAIZ J, SIAHKOLAH B. New controller for an electronic tap changer—Part I: design procedure and simulation results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 223-229.
[26] FAIZ J, SIAHKOLAH B. New controller for an electronic tap changer—Part II: measurement algorithm and test results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 230-237.
[27] YANG M, DESWAL D, DE LEON F. Mitigation of half-cycle saturation of adjacent transformers during HVDC Monopolar operation—part I: mitigation principle and device design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2232-2239.
[28] 司马文霞，刘 蕙，厉 璇，等. 换流变压器真空有载分接开关切换过程电气应力解析方法[J]. 中国电机工程学报，2022，42(18)：6908-6918.
SIMA Wenxia, LIU Hui, LI Xuan, et al. Analysis method of electrical stresses during switching process of vacuum on-load tap-changer in converter transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6908-6918.



司马文霞
1965—，女，博士，教授，博导，教育部“长江学者”特聘教授
主要从事电磁暂态感知、建模、分析与防护；电网雷电致灾机理与接地防护技术；电力装备绝缘失效机制与防御技术研究工作
E-mail: cqsmwx@cqu.edu.cn
SIMA Wenxia
Ph.D., Professor



杨 鸣(通信作者)
1987—，男，博士，教授，博导
主要从事交直流电网电磁暂态特性分析与防护、变压器类装备电磁暂态建模与应用、新型直流装备电磁暂态建模与应用研究工作
E-mail: cqucee@cqu.edu.cn
YANG Ming
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-11-30 修回日期 2023-05-26 编辑 卫李静

附录 A　有载切换暂态分析

步骤(a)时，主触头 MC1 闭合，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 MC1 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=0 \tag{A1}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A2}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\frac{1}{2}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A3}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{I} \tag{A4}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{MCF}$、$\boldsymbol{U}_{VF}$、$\boldsymbol{U}_{GF}$ 和 $\boldsymbol{U}_{ZF}$ 分别为主触头、真空触头、隔离触头、辅助触头承受的恢复电压；$\boldsymbol{I}_{MCF}$、$\boldsymbol{I}_{VF}$、$\boldsymbol{I}_{GF}$ 和 $\boldsymbol{I}_{ZF}$ 分别为主触头、真空触头、隔离触头、辅助触头承载电流；$\boldsymbol{I}$ 为负载电流；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}$ 为分接开关的级间电压(F=1,2,3)。

步骤(b)时，负载电流通过 V3 与 Z1 输出。各触头恢复电压同式(A1)、式(A2)及式(A3)。触头断开时电流为 0，触头闭合时电流表达式为：

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{Z1}}=\boldsymbol{I} \tag{A5}$$

步骤(c)时，G2 闭合，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 V3 与 Z1 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=0 \tag{A6}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A7}$$

步骤(d)时，V1 闭合，V3 断开，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 V1 与 G1 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=0 \tag{A8}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{I}R \tag{A9}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}+\boldsymbol{I}R \tag{A10}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}+\boldsymbol{I}R \tag{A11}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A12}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{I} \tag{A13}$$

式中：R 为过渡电阻。

步骤(e)时，V2 闭合，分接开关桥接，产生循环电流，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 V1 与 V2 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=0 \tag{A14}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{V1}}R \tag{A15}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{V2}}R \tag{A16}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=-(\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}-R\boldsymbol{I}_{\mathrm{V2}}) \tag{A17}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A18}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{G1}}=\frac{1}{2}\times(\boldsymbol{I}-\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}}{R}) \tag{A19}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{G2}}=\frac{1}{2}\times(\boldsymbol{I}+\frac{\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}}{R}) \tag{A20}$$

步骤(f)时，V1 断开，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 经过 V1 与 G2 输出。

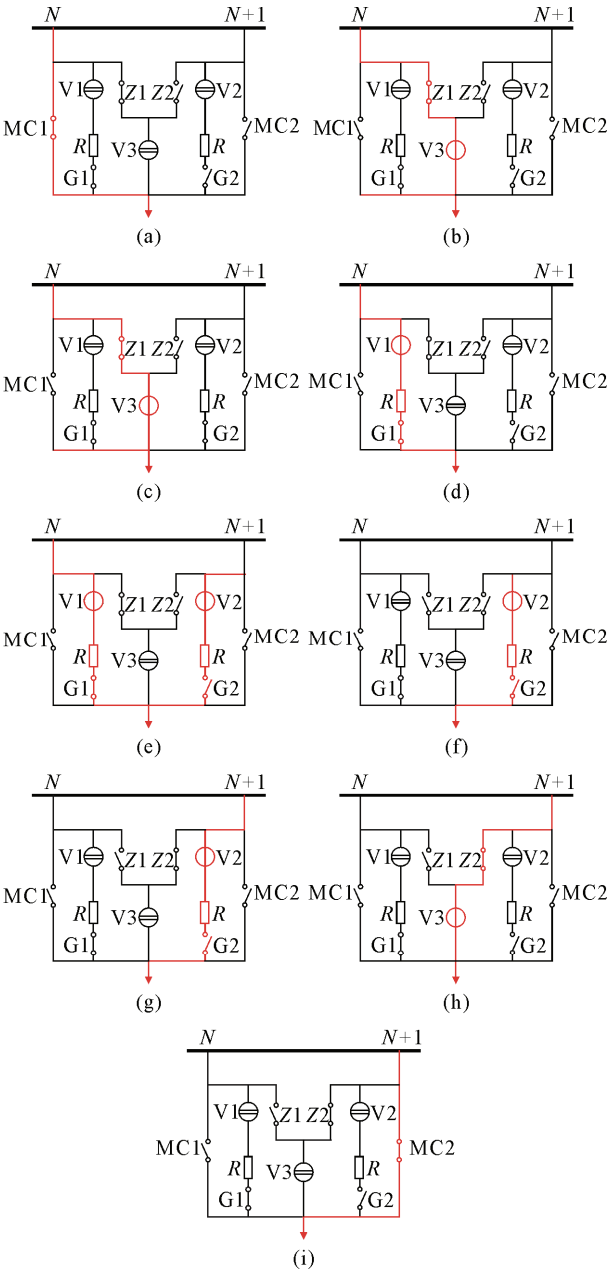


图 A1　切换开关过渡电路及变换过程

Fig.A1　Circuit and transient process of diverter switch

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=-(\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}-\boldsymbol{I}R) \tag{A21}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\frac{2}{3}\boldsymbol{I}R-\frac{1}{3}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A22}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=0 \tag{A23}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=\frac{1}{3}\boldsymbol{I}R-\frac{2}{3}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A24}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\frac{1}{3}\boldsymbol{I}R+\frac{1}{3}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A25}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{I}R \tag{A26}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{I} \tag{A27}$$

步骤(g)时，Z2 闭合，负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 V2 与 G2 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=-(\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}}-\boldsymbol{I}R) \tag{A28}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{I}R \tag{A29}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=0 \tag{A30}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A31}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{I} \tag{A32}$$

步骤(h)时，V2 断开，V3 闭合。负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 V3 与 Z2 输出。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A33}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=-\frac{1}{2}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A34}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=0 \tag{A35}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{I}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{I} \tag{A36}$$

步骤(i)时，V3 断开，MC2 闭合。负载电流 $\boldsymbol{I}$ 通过 MC2 输出，各触头恢复电压与承载电流解析式如下，分接变换结束。

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z1}}=-\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A37}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V1}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G1}}=-\frac{1}{2}\boldsymbol{U}_{\mathrm{S}} \tag{A38}$$

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{V3}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{V2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{G2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{Z2}}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{MC2}}=0 \tag{A39}$$

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{MC2}}=\boldsymbol{I} \tag{A40}$$

附录 B

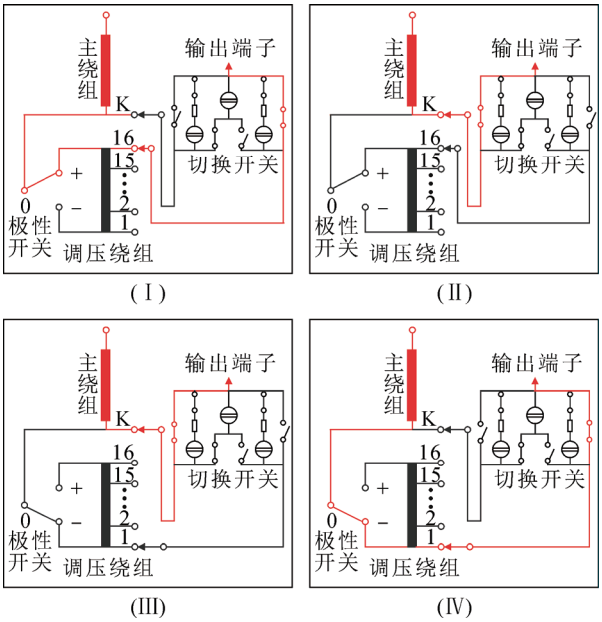


图 B1　极性转换工作原理

Fig.B1　Principle of change-over operation.

附录 C

切换开关动作顺序分析：

中国电科院提出的真空 OLTC 过渡电路切换周期为 80 ms，各触头时序设置如图 C1 所示。

t_1：分接开关工作在 N 档位，MC1 闭合载流，5 ms；

t_2：MC1 断开，V3 闭合，10 ms；

t_3：G2 闭合，10 ms；

t_4：V1 闭合，10 ms；

t_5：V2 闭合，分接开关桥接，10 ms；

t_6：V1 断开，Z1 断开，10 ms；

t_7：Z2 闭合，10 ms；

t_8：V3 闭合，G1 断开，10 ms；

t_9：MC2 闭合，V3 断开，5 ms。

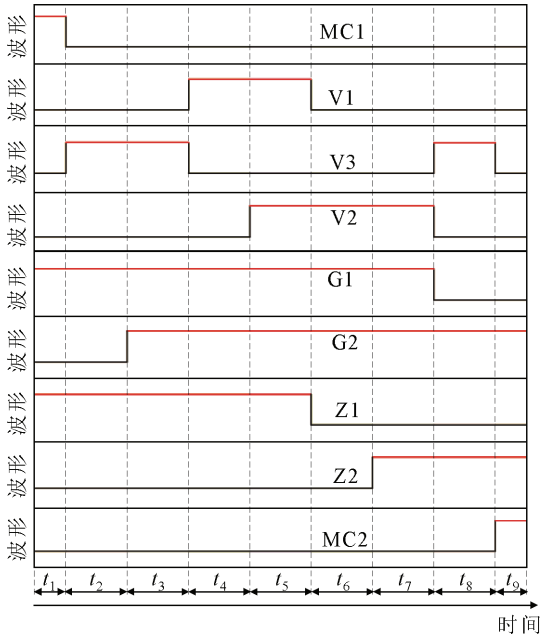


图 C1　切换开关动作程序波形图

Fig.C1　Transient program waveform of diverter switch