

DOI: 10.7667/PSPC160290

# 基于 RT-LAB 的高频链直流变压器实时仿真研究

孙谦浩<sup>1</sup>, 宋强<sup>1</sup>, 王裕<sup>1</sup>, 赵彪<sup>1</sup>, 赵宇明<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518048)

**摘要:** 针对高频链直流变压器多模块特性与高频特性带来的仿真实现困难问题, 提出了在 RT-LAB 仿真平台上实现其实时仿真的具体方法及理论分析。所提出的方法中, 控制系统与主电路系统采用不同的仿真步长分别在 CPU 仿真器与 FPGA 仿真器中完成, 能够在满足两者对仿真步长不同要求的基础上, 实现实时仿真资源的充分利用。同时, 对高频串联电感的分割原理进行了理论分析, 以完成多个 FPGA 仿真模块的联合实时仿真运行, 从而在根本上解决了高频链直流变压器由于多模块化与高频特性所带来的实时仿真矛盾。最后, 利用上述理论与方法, 完成了一个高频链直流变压器的实时仿真模型, 并将其与 Matlab 离线仿真进行了对比实验。实时仿真实验结果证明了所提出的仿真方法和理论分析的正确性以及高频链直流变压器实时仿真的快速性与实用性。

**关键词:** 高频链直流变压器; RT-LAB; FPGA; 多内核 CPU; 多步长实时仿真

## Real-time simulation research of high frequency link DC solid state transform based on RT-LAB

SUN Qianhao<sup>1</sup>, SONG Qiang<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, ZHAO Biao<sup>1</sup>, ZHAO Yuming<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shenzhen Power Supply Bureau Corporation, Shenzhen 518048, China)

**Abstract:** This paper aims at the simulation problem which is caused by multiple modular characteristic and high frequency of high frequency link DC solid state transformer (HFL-DCSST). The method of achieving HFL-DCSST's real-time simulation is presented and the theory is analyzed. In the aforementioned method, the control system is achieved in CPU while the main circuit is completed in FPGA. Not only can this action satisfy the demand for simulation step but also make full use of resource. In order to solve the problem which from HFL-DCSST's multiple modular characteristic and high frequency, the theory of inductor segmentation is analyzed. And then, the HFL-DCSST model can real-time running with multi-FPGA simulator. At last, a model of HFL-DCSST is completed in this way, and the result of comparative experiment with Matlab offline simulation verifies the correctness of the theory and the practicality of HFL-DCSST's real-time simulation.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050103).

**Key words:** HFL-DCSST; RT-LAB; FPGA; multi-core CPU; multi-step real-time simulation

## 0 引言

近年来, 随着柔性直流技术和大功率电力电子技术的发展, 直流配电网技术为解决新能源和分布式电源的并网接入问题提供了新的途径<sup>[1-4]</sup>。在柔性直流配电网中, 采用高频链(High Frequency Link, HFL)隔离的直流变压器(DC Solid State Transform, DCSST)是进行不同等级直流电压和直流能量变换的关键设备<sup>[5-6]</sup>。

由于目前对于 HFL-DCSST 的研究才刚刚开始, 其控制系统和主电路系统参数设计仍不是很成熟, 所以在其研制以及试验中会存在许多不确定性, 此时, 仿真便成为其研究过程中必不可少的环节。但 HFL-DCSST 的主要特点是其所具有的高频特性和多模块特性<sup>[7]</sup>, 而两者对于仿真系统的不同要求造成了对其进行仿真的主要困难。

1) 高频特性使得满足其要求的仿真步长很小, 离线仿真与基于 CPU 的实时仿真很难在该步长下满足快速性。通常情况下, 仿真步长应至少为开关频率的 20 倍, 这样对于开关频率至少在 10 kHz 的 HFL-DCSST 的仿真步长应在 5  $\mu$ s 以下。对于

Matlab/Simulink 或 PSCAD/EMTDC 等离线仿真软件, 将会花费极其长的仿真时间。基于 CPU 的实时仿真由于本身技术的限制, 仿真步长无法做到  $10 \mu\text{s}$  以下。

2) 多模块特性造成 HFL-DCSST 系统比较庞大, 仿真时需要采集、传输和存储的数据量较多。为了满足这种庞大系统仿真时的快速性, 就需要增大仿真步长, 而这与 1) 中的要求相矛盾。尤其是在对包含有 HFL-DCSST 的直流配电系统进行仿真时, 若以满足 HFL-DCSST 的步长进行离线仿真时, 会使离线仿真无法进行。

文献[8-13]主要采用 PSCAD 离线仿真和基于 CPU 的 RT-LAB 仿真平台对光伏系统、储能系统、高压直流输电系统以及不含高频链直流变压器的直流配电系统进行了研究。文献[14-15]主要对 MMC 系统和 Buck/Boost 型 DC/DC 变换器在基于 FPGA 的 RT-LAB 实时仿真器上的实现进行了研究, 但对于高频链结构的多模块变换器的实时仿真实现至今仍未有文献涉及。本文针对高频链直流变压器的特征, 在基于 FPGA 与多内核 CPU 联合运行的 RT-LAB 实时仿真平台对其进行了仿真。首先给出了实时仿真的具体实现方法, 然后, 针对仿真过程中的问题, 提出了相关解决方案。最后, 完成了一台高频链直流变压器的实时仿真, 并对其进行了启动实验与功率反向实验。实验结果验证了所提出的实时仿真方法的正确性, 同时也表明了实时仿真在高频链多模块结构变换器中应用的可行性与实时仿真模型的实用性。

## 1 典型高频链直流变压器及其控制设计

### 1.1 基于 DAB 的高频链直流变压器

HFL-DCSST 的最典型结构是以高频隔离的双主动全桥 DC/DC 变换器(Dual Active Bridge, DAB)为基本单元, 在高压侧串联提高电压等级, 在低压侧并联提高电流等级, 如图 1(a)所示。由于采用了高频变压器, 整个系统的功率密度将显著提高。

### 1.2 高频链直流变压器的控制设计

对于 HFL-DCSST 主要采用移相控制原理, 如图 1(b)所示。通过控制全桥单元分别在高频链环节产生交流方波, 调节两个交流方波之间相移的大小和方向就可以控制功率流动的大小和方向。与传统交流系统变换器中调制的工频正弦波不同, HFL-DCSST 的交流波是高频方波, 因此需要更小的仿真步长, 对实时仿真的需求更加迫切。

在 HFL-DCSST 中, 除了对每个 DAB 模块进

行高频调制外, 还需要对各模块之间电压和电流平衡进行控制。此时, 只需要采用电压均衡控制器对输入串联输出并联型直流变压器进行控制, 保证串联侧电压平衡即可<sup>[7]</sup>。

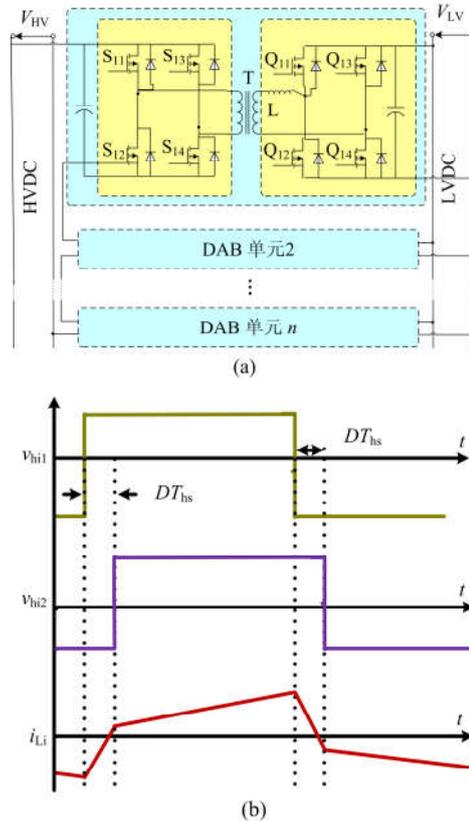


图 1 HFL-DCSST 的主电路与控制系统

Fig. 1 Topology and control system of HFL-DCSST

## 2 HFL-DCSST 实时仿真建模实现分析

### 2.1 HFL-DCSST 实时仿真建模

高频链直流变压器主要由控制系统与主电路系统构成。其中, 控制系统对信号进行分析与处理, 完成控制算法的计算, 可以采用较大的仿真步长在基于 CPU 的仿真器中实现实时仿真; 主电路中, 由于高频链交流环节的存在, 需采用  $5 \mu\text{s}$  以下的仿真步长。为了充分利用实时仿真资源, 并满足控制算法与电路结构研究的不同需要, 本文利用多步长多仿真器实现 HFL-DCSST 的实时仿真。图 2 给出了 HFL-DCSST 实时仿真的整体设计方案。控制系统采用  $50 \mu\text{s}$  的较大步长在 CPU 仿真器中运行计算, 主电路模型则在 FPGA 中以  $800 \text{ ns}$  为步长运行计算。两者之间通过 PCIE 总线进行信息与触发脉冲的交互(其中, FPGA 与 CPU 的配置方法以及 FPGA 中主电路的实时仿真建模将在下文中具体介绍)。

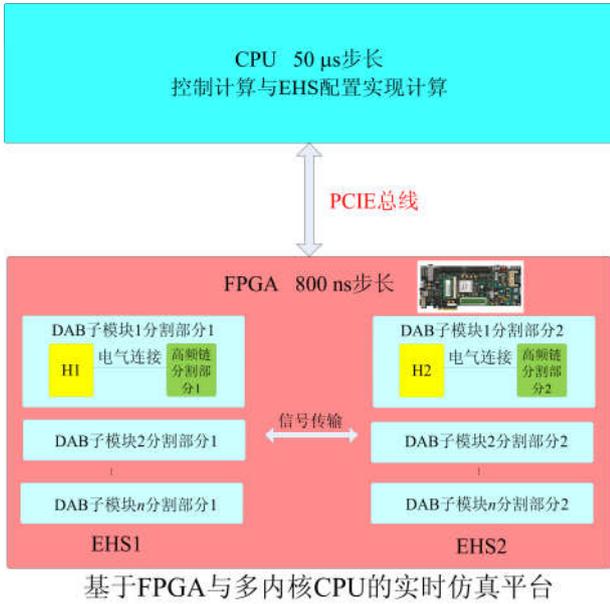


图 2 HFL-DCSST 实时仿真方案

Fig. 2 Scheme of HFL-DCSST real-time simulation

### 2.2 基于 RT-LAB 的 HFL-DCSST 的实时仿真建模流程设计

图 3 给出了 HFL-DCSST 在 RT-LAB 实时仿真平台上建模实现的流程图，主要步骤包括：1) 在上位机上利用软件(RT-XSG)完成联系 CPU 与 FPGA 的配置文件模型，生成 FPGA 的配置文件，该配置文件是具有通用性的(在实时仿真使用的 FPGA 板卡数量相同时)，只需成功编译并生成一次即可；2) 在 Matlab 环境下完成 HFL-DCSST 主电路和控制电路的建模并根据 DCSST 主电路和控制系统的特点对模型进行合理的分割修改(具体分割过程见第 3 节)和编号处理；3) 在 RT-LAB 环境下通过电气硬件仿真解算器(Electrical Hardware Simulation, EHS)模块与生成的 FPGA 配置文件配置分割后的主电路模型，建立 CPU 与 FPGA 之间的参数传输，观察和分析运行结果，若运行结果合理即完成模型的实时化。

### 2.3 HFL-DCSST 实时仿真的硬件资源估算及实时仿真平台

HFL-DCSST 的实时仿真实现需要在硬件平台的 CPU 中完成控制电路的计算和 EHS 的配置实现计算。不同的控制算法，在 CPU 中所占的内核数不同。对于上述典型的单移相控制，由于控制算法并不复杂，可以将几个子模块的控制器放入同一核中进行仿真。而 EHS 的配置计算则需要根据每个 FPGA 板卡中所含 EHS 硬件仿真模块，将同一个

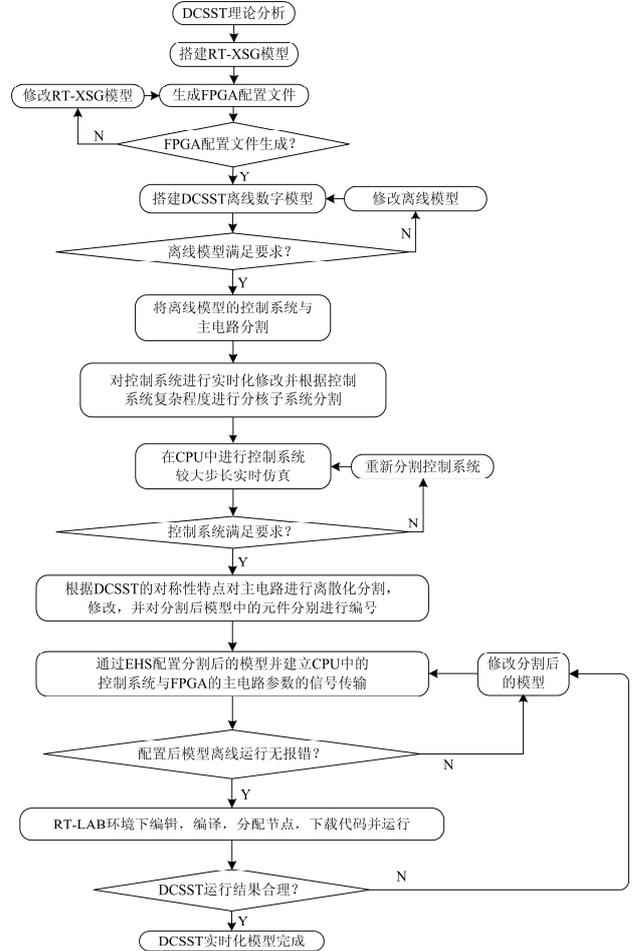


图 3 HFL-DCSST 实时仿真流程图

Fig. 3 Flow chart of HFL-DCSST real-time simulation

FPGA 的所有 EHS 配置计算模块放入 CPU 的同一核中。当然，如果 DCSST 整个控制系统规模不大，也可以将控制系统和 EHS 配置实现模块放入同一核中。所以，对于实时仿真硬件平台的 CPU 而言，所具有的内核数应至少满足以上所分析的控制电路的计算和 EHS 的配置计算所占核数之和。对于 HFL-DCSST 的主电路，由于需要在 FPGA 中完成其进行极小步长仿真建模，所以需要根据 FPGA 中 EHS 仿真模块对开关器件数量和总元件数量的要求来选择所需的 EHS 仿真功能模块数以及 FPGA 板卡数。通常情况下，对于含有  $n$  个子模块单元的 DCSST 进行实时仿真所需的 EHS 仿真模块数  $NEHS = \text{MAX}\{[8n/a], [(22n+b_1)/b]\}$ ，而所需 FPGA 板卡数为  $N_{FPGA} = NEHS/c$ ，其中函数  $\text{MAX}\{x, y\}$  为取较大值函数，函数  $[x]$  为向上取整函数， $a, b$  分别为每个 EHS 仿真模块所允许仿真的开关器件数目与元件总数目， $b_1$  为电源数量(在 EHS 仿真模块中电阻不计算元件个数，可以无限多)， $c$  为每个

FPGA 板卡所含的 EHS 仿真模块数,  $8n$  为每个 DAB 模块所包含的开关器件数,  $22n$  为每个 DAB 模块的元件总数目(根据 EHS 的建模方法, 在计算元件总数时, 每个开关器件记为一个开关元件和一个电容, 每个两绕组变压器记为 3 个电感元件)。

本次实时仿真实验平台分别采用 OPAL-RT 公司生产的 OP5600 与 OP7000 作为 CPU 仿真器与 FPGA 仿真器, 如图 4 所示。其中, 每个 OP5600 中含有两个主频为 3.47 GHz 的 6 核 CPU, 每个 OP7000 中含有两 Virtex6 XC6VLX240T 型号的 FPGA 仿真板卡, 每一块 FPGA 板卡设有两个硬件仿真模块 (EHS1 和 EHS2), 每个 EHS 仿真模块中只允许使用 SPS 模块中的电源、电容、电感、电阻、变压器以及理想开关, 而且每个模块中所允许的开关管数量不能超过 24 个, 所有元件总数(不含电阻)不能大于 63 个。因此, 通过计算可知, 本次实验需要上述两种机器各一台。

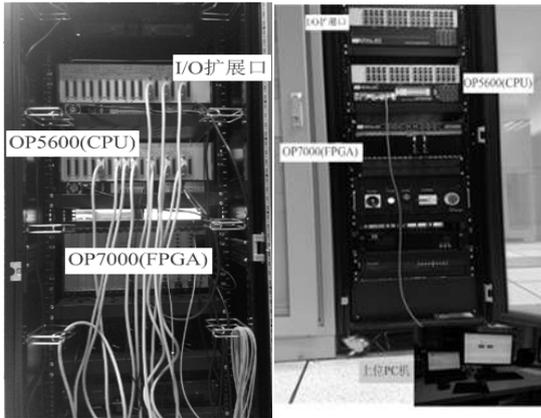


图 4 RT-LAB 实时仿真平台

Fig. 4 Platform of RT-LAB real-time simulation

### 3 高频链环节的离散化分割原理

由于 HFL-DCSST 系统的多模块特性, 使得整个主电路系统的仿真在单个 EHS 中难以完成, 因此需要对 HFL-DCSST 系统进行合理的分割, 通常情况下, 可以以单个子模块为单元对模型进行分割。但这种方法对于子模块数较多时, 对硬件资源会有极大的浪费, 而且由于 EHS 仿真模块自身的特点(每个 EHS 仿真模块之间无电气连接, 只有信号传输), 这种分割方式很难将控制系统与主电路联系起来, 不能保证各部分模型的整体性, 因此, 本文提出了将 HFL-DCSST 系统在高频链环节的理想变压器  $T$  与等效电感  $L$ (包含实际电感值和变压器漏感值)处进行分割的方案。通过利用延迟环节与等效受控电压源, 可以方便地将高频环节分割, 这样既可以满足整个系统的仿真精确性又分别保

证了控制系统与主电路系统的整体性, 方便对每一部分进行修改与分析, 使得两部分模型都具有很好的可移植性与高适应性。

根据图 1(a)所示的电路结构, 高频链环节的分割方法有 3 种:

- 1) 只将理想变压器  $T$  进行离散化模型分割, 等效电感  $L$  不进行分割;
- 2) 只将等效电感  $L$  进行离散化模型分割, 理想变压器  $T$  不作分割;
- 3) 将理想变压器  $T$  与等效电感  $L$  同时进行离散化分割。

方法 3)可以保证分割后模型的对称性, 方法 1)和方法 2)分割后的两部分模型稍有不同。但在实际的分割操作中, 由于变压器的离散化模型中包含变压器一二次绕组的自感和互感参数, 对其进行离散化模型分割时需要的参数获取比较困难, 所以, 本文采用工程实现最为简洁和有效的方法 2)进行模型的分割。

图 5 给出了电感的离散化模型分析图, 电感的连续模型为

$$L \frac{di_L}{dt} = U_k(t) - U_m(t) \quad (1)$$

式中:  $U_k(t)$ ,  $U_m(t)$ 分别为电感两端在  $t$  时刻的电压;  $i_L(t)$ 为  $t$  时刻流过电感的电流;  $L$  为电感值。

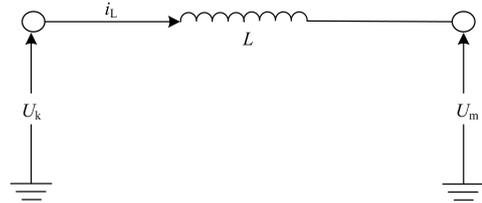


图 5 电感的离散化模型分析图

Fig. 5 Analysis picture of discrete inductor

将式(1)变为积分形式并离散化, 可得

$$\begin{aligned} i_L(t) &= i_L(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t (U_k - U_m) dt = \\ i_L(t - \Delta t) &+ \frac{\Delta t}{2L} \left( (U_k - U_m)_{(t)} + (U_k - U_m)_{(t-\Delta t)} \right) = \\ i_L(t - \Delta t) &+ \frac{\Delta t}{2L} (U_k - U_m)_{(t)} + \frac{\Delta t}{2L} (U_k - U_m)_{(t-\Delta t)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{令上式中 } \Delta t/2L &= R_e, \quad (U_k - U_m)_{(t)} = U_L(t), \\ i_L(t - \Delta t) &= i_L^*, \quad i_L(t) = i_L, \text{ 对其进行变形, 得} \\ U_L(t) &= R_e \times i_L - R_e \times i_L^* - U_L(t - \Delta t) \end{aligned} \quad (2)$$

对式(2)进行进一步变形如下:

$$U_L(t) = R_c \times i_L - R_c \times i_L^* - U_L(t - \Delta t) = \frac{R_c}{2} \times i_L - \frac{R_c}{2} \times i_L^* + (0 - U_k^*) + \frac{R_c}{2} \times i_L - \frac{R_c}{2} \times i_L^* + (U_m^* - 0) \quad (3)$$

式(3)即给出了电感的离散化分割原理,式(3)

表明利用延迟环节和受控电压源可以方便地将电感模型分割为对称的两部分。同样地,利用该原理将所有 DAB 单元分割,便可得到整体 HFL-DCSST 的分割原理如图 6,整个直流变压器通过高频链环节的分割被分割为两部分,可以分别放入两个 EHS 模块中进行仿真试验,克服了由于系统庞大造成的仿真困难与不足。

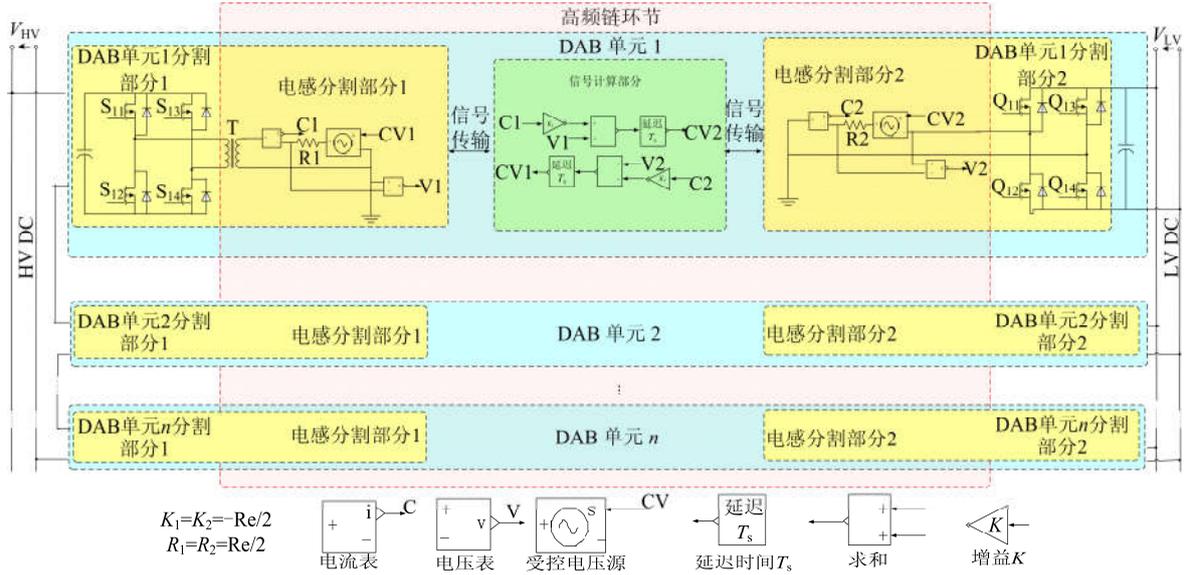


图 6 HFL-DCSST 高频链环节的离散化分割模型

Fig. 6 Discrete segmentation of HFL-DCSST's high frequency link

#### 4 HFL-DCSST 实时仿真实验结果

##### 4.1 高频链直流变压器的实时仿真实验

在实时仿真平台中完成了 3 个子模块的 HFL-DCSST 模型,并进行了启动实验、稳态实验以及功率反向的暂态实验。实验中,在高压侧施加电压为 6 kV 的直流电压,启动电阻选为 500 Ω,稳态运行时的负载电阻为 5 Ω,功率反向时的负载电阻为 2 Ω,受控电压源电压由 300 V 变为 500 V,其余实验参数如表 1 所示。

图 7 给出了实验简化图,仿真实验过程如下。

1) 负载开关 SW2 处于断开状态,闭锁 H1 组和 H2 组的开关管脉冲,断开开关 SW1,闭合开关 SW3,使充电电阻 R\_ch 接入电路,对 H1 组的电容进行充电。

2) 当高压侧(H1 组)的电容电压约为 0.7~0.8 p.u.时,同时打开 H1 组与 H2 组的触发脉冲,同时对高压侧(H1 组)和低压侧(H2 组)的电容进行充电,至高低压侧电压达到稳定值(约为 1 p.u.)。

3) 闭合开关 SW1,将充电电阻旁路,接着闭

表 1 HFL-DCSST 实验参数表

Table 1 Experiment parameter table of HFL-DCSST

元件	参数
HFL-DCSST 子模块数	3
DAB 子模块直流电容 C1	2200 μF
DAB 子模块直流电容 C2	2200 μF
变压器变比 n:1	5:1
辅助电感 L	300 μH
开关频率 f <sub>s</sub>	20 kHz
DCSST 高压侧电压	6 kV
DAB 子模块高压侧均压	2 kV
DCSST 低压侧被控电压	400 V

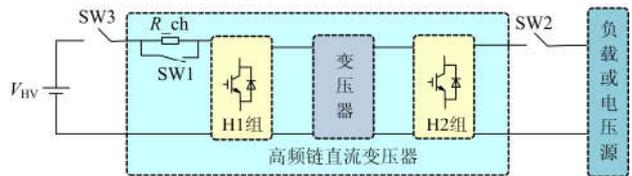


图 7 实时仿真实验简化图

Fig. 7 Simplified chart of real-time simulation experiment

合负载开关 SW2,对负载供电,使得电路达到稳态运行状态,观察稳态实验结果。

4) 变电阻负载为可控电压源, 进行功率反向的暂态实验。具体实验结果如下。

#### 4.1.1 启动过程暂态实验结果

图 8 给出了启动过程实验结果。从结果可以看出, 启动过程中, 高低压侧电压均没有出现超调, 且高压侧最大冲击电流发生在 SW3 闭合时, 即直流电源接入时, 此时冲击电流约为 1.2 倍的额定值, 随后, 高压侧电流逐渐减小到 0。在 2.2 s 时, 旁路充电电阻此时会发生电流冲击, 但该冲击值并未超过额定电流值, 整个启动过程满足要求。实验结果验证了启动过程中实时仿真模型的正确性。

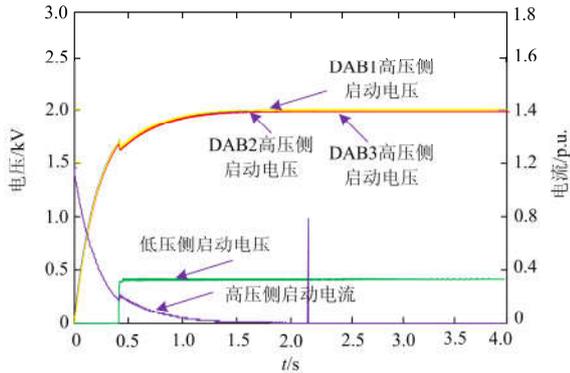
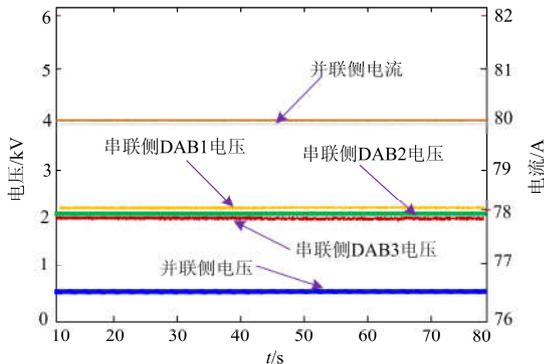


图 8 启动过程实验结果

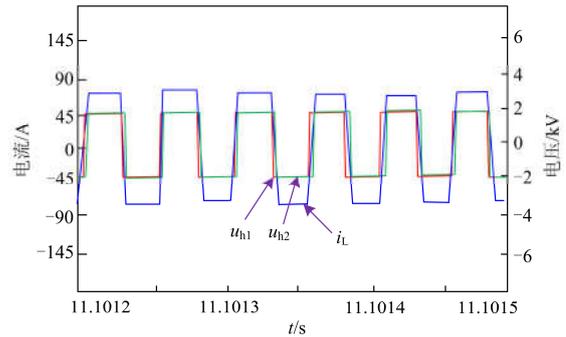
Fig. 8 Result of start procedure experiment

#### 4.1.2 稳态实验结果

图 9 给出了稳态实验结果。从图 9(a)中可以看出, 3 个 DAB 子模块的串联侧电压在稳态时通过均压环得到了很好的均压功能, 基本稳定在 2 kV 附近, 而并联侧电压也可以很好地控制在参考值 400 V 附近。同时图 9(b)给出了 DAB1 单元稳态时的高频链环节两端的电压和电感电流波形。由于变压器变比匹配, 电感电流接近于梯形波, 且该情况下的移相比(移相角在半个开关周期所占的比例)约为 1/8, 实验结果表明, 实时仿真模型能够很好地反映高频链直流变压器的稳态开关特性, 验证了稳态运行时实时模型的正确性。



(a) 稳态实验电压电流波形



(b) 稳态实验DAB1高频链环节的电压电流波形

图 9 稳态实验结果

Fig. 9 Result of steady experiment

#### 4.1.3 暂态实验结果

图 10 为负荷功率反向时的实验结果。从实验结果可知, 73 s 时, 负荷功率方向发生反转, 此时低压侧电压发生波动, 但经过短暂的波动后又恢复在 400 V, 且波动过程中, 最大瞬时电压不超过 1.03 倍的额定电压(412 V), 验证了实时模型在负荷功率方向时的正确性。

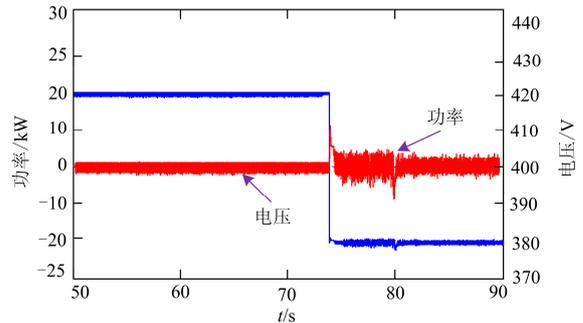


图 10 暂态实验结果

Fig. 10 Result of transient experiment

### 4.2 高频链直流变压器的实时仿真与离线仿真对比实验

为了说明实时仿真的快速性和实用性, 在 Matlab 中搭建与上述实时仿真中参数相同的离线模型并将其仿真时间与实时仿真时间进行对比, 离线仿真的仿真步长取 2.5 μs(由于开关频率为 20 kHz, 所以此步长为仿真所允许的最大步长)。对比实验中, 将两个仿真系统同时仿真 2.5 s, 测量其实际所用时间, 结果如表 2。

从表 2 中可知, 对于 3 个子模块 HFL-DCSST 离线仿真时间是实时仿真的大约 44 倍。随着模块数的增加, 实时仿真的快速性将会更加明显。同时在实际应用中, 当直流变压器的规模太大或仿真时间延长时, 离线仿真系统会出现不能进行仿真而报

错的情况。而对于实时仿真而言，只要硬件资源充足，可以应用于任何数量子模块的 HFL-DCSST 无限时仿真研究，具有很强的实用性。

表 2 3 个子模块 HFL-DCSST 仿真时间对比结果

Table 2 Comparative table of simulation time for 3 modules HFL-DCSST

仿真方式	实际时间/s
离线仿真	110
实时仿真	2.5

### 5 结语

本文针对高频链直流变压器研究中存在的研制周期长，参数设计不成熟，离线仿真所需时间过长甚至不能进行离线仿真的问题，提出了将基于 FPGA 和多核 CPU 的 RT-LAB 实时仿真应用到 HFL-DCSST 的研究中，并给出了具体的实现方法和理论分析。在实时仿真平台中完成了 3 个子模块的 HFL-DCSST 实时仿真模型，并进行了实验，实验结果表明，实时仿真模型在不同的运行情况下都能够良好地反映直流变压器的特性。同时，该模型可以从根本上解决高频链直流变压器离线仿真时间限制问题以及仿真时间严重超时问题。本文所做的工作说明了 RT-LAB 实时仿真在研究 HFL-DCSST 的过程中具有明显优势，可以成为研究其性能的强有力工具，同时也为其他高频链多模块结构变换器的实时仿真实现提供了可行的思路，奠定了应用 HFL-DCSST 的中压直流配电系统宽频带研究的实时仿真基础。

### 参考文献

[1] 杜翼, 江道灼, 尹瑞, 等. 直流配电网拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 139-145.  
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 139-145.

[2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[3] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.

SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.

[4] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 75-80.  
DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 75-80.

[5] 王成山, 丁承第, 李鹏, 等. 基于 FPGA 的配电网暂态实时仿真研究(二): 系统架构与算例验证[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 628-634.  
WANG Chengshan, DING Chengdi, LI Peng, et al. Real-time transient simulation for distribution systems based on FPGA, part II: system architecture and algorithm verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 628-634.

[6] 师长立, 唐西胜, 李宁宁, 等. 基于全桥隔离双向变换器直流变换技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 121-127.  
SHI Changli, TANG Xisheng, LI Ningning, et al. DC changing technologies based on dual-active-bridge converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 121-127.

[7] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295-4303.  
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.

[8] 周林, 贾芳成, 郭珂, 等. 采用 RT-LAB 的光伏发电仿真系统试验分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2814-2840.  
ZHOU Lin, JIA Fangcheng, GUO Ke, et al. Testing analysis on a kind of PV generation simulation system using RT-LAB[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2814-2840.

[9] 高尚, 祁新春, 谢涛, 等. 共直流母线光伏-混合储能发电系统及其双重滤波优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 92-97.  
GAO Shang, QI Xinchun, XIE Tao, et al. Common DC bus based PV-hybrid energy storage power system and

- optimal control using double filters[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 92-97.
- [10] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 272-276.  
ZHANG Guoju, CHEN Yao, TANG Xisheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation characteristic parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 272-276.
- [11] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.  
WANG Qian, SONG Qiang, XU Shukai, et al. Real-time simulation of MMC based HVDC power transmission system using RT-LAB[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40.
- [12] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.  
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [13] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [14] OU Kaijian, RAO Hong, CAI Zexiang, et al. MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1109-1116.
- [15] WANG Can, LI Wei, BELANGER J. Real-time and faster-than-real-time simulation of modular multilevel converters using standard multi-core CPU and FPGA chips[C] // Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE, Nov 10-13, 2013, Vienne, Austria.

---

收稿日期: 2016-03-08; 修回日期: 2016-04-26

作者简介:

孙谦浩(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流配电网技术和直流系统仿真技术; E-mail: sxsunqianhao@163.com

宋强(1975-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为柔性直流输配电技术和大功率电力电子技术;

王裕(1984-), 男, 博士, 主要研究方向为柔性直流配电网技术和智能功率变换技术。

(编辑 魏小丽)