

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.005

# 基于 PET 控制特性的交直流配电网直流侧低频振荡分析

范栋琛<sup>1</sup>, 张宸宇<sup>1</sup>, 姜云龙<sup>1</sup>, 刘文凯<sup>2,3</sup>, 袁宇波<sup>1</sup>, 袁小明<sup>3</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103;

2. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 浙江 杭州 310016;

3. 强磁场工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

**摘要:**随着新能源、储能和柔性直流技术的发展,交直流混合配电网逐渐成为未来配电网的重要发展方向,大量电力电子设备接入给配电网带来了低频振荡等动态问题。为深入研究交直流混合配电网直流侧低频振荡问题,文中根据交直流配电网系统实际工程应用,对电力电子变压器主阀塔中的 H 桥串联和隔离型双向有源桥结构、三相逆变器以及三相 Buck 变换器等关键环节进行详细建模。通过时域仿真,复现了该交直流配电网实际工程中直流侧的 4 Hz 低频振荡现象,验证了所建数学模型的正确性。基于所建数学模型对功率和控制器参数等关键影响因素进行了定性分析,最终得出结论如下:功率水平、Buck 环节电压环控制参数影响系统稳定性;Buck 环节电流环积分系数影响振荡频率。

**关键词:**交直流配电网;电力电子变压器;低频振荡;三相 Buck 变换器;时域仿真;振荡原因

**中图分类号:** TM712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)03-0036-08

## 0 引言

在交流配电网的基础上建设交直流混合配电网是未来配电网的发展趋势<sup>[1-2]</sup>。电力电子变压器(power electronic transformer, PET)因其交直流转换的灵活性,在交直流配电网中得到了广泛应用。因 PET 含有多个 PET 模块,其接入配电网势必会对配电网的稳定运行造成影响<sup>[3]</sup>。在某交直流混合配电网试验过程中,其直流侧出现了 4 Hz 左右低频振荡的现象,影响了该配电网的稳定运行,因此有必要深入研究该配电网的稳定性问题。

目前针对含 PET 的交直流配电网研究可概括为两方面:一是 PET 装备本身的拓扑和控制研究,二是含 PET 的交直流配电网研究。在 PET 的拓扑与控制方面,文献[4-9]介绍了 PET 的分类、拓扑、控制方式,并进行了各类 PET 的优缺点比较。由目前的研究可知,有关 PET 的拓扑及控制研究较为完善。在含 PET 的交直流配电网研究方面,文献[10]针对交直流配电网中的多端口 PET,提出其稳态模型,重点研究以交直流系统节点电压偏移最小为目标的 PET 功率-电压协调控制方法。文献[11]在能效评估方面针对含 PET 的交直流混合电网建立了一种改进的综合能效评估模型。文献[12]基于含 PET 的交直流配电网故障穿越,提出一种改进的依据电压跌落深度分段不同特性调节无功电流给定

的控制策略。文献[13]主要针对多端口 PET 交直流配电网建立了可靠性评估方法。文献[14]针对配电网进行了大扰动条件下的稳定性分析。上述文献对含有 PET 的交直流配电网在过电压<sup>[15]</sup>、潮流计算<sup>[16]</sup>、继电保护<sup>[17]</sup>、状态估计<sup>[18]</sup>等方面均进行了研究,但针对交直流配电网的小扰动稳定性研究以及对于系统直流侧出现低频振荡现象的介绍少有涉及。

为深入研究该低频振荡现象,文中从实际网架结构出发,对该交直流配电网系统进行了模型简化,分别介绍了系统中各个模块的主要结构及其作用,并最终在 Matlab 中建立了该系统的数学模型,还原了 4 Hz 的振荡波形,验证了数学建模的正确性并对影响振荡的因素做了定性分析。该数学模型的建立有助于认识交直流配电网的低频振荡现象,为后续系统小信号稳定性分析、振荡机理解释和优化控制奠定基础。

## 1 多端口交直流配电网场景概述

在某交直流配电网的 PET 与电压源换流器(voltage-sourced converter, VSC)功率对拖试验过程中,运行方式如图 1 所示。交直流配电网系统主要有 2 个闭合回路:一个是由 VSC2 和 750 V 直流母线构成的 750 V 闭合回路(用绿线表示);另一个是由 VSC1 和 375 V 直流母线构成的 375 V 闭合回路(用红线表示)。当 PET 的 750 V 端口连接到 VSC2 (传输功率为 1 200 kW),375 V 端口连接到 VSC1,

收稿日期:2022-12-13;修回日期:2023-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1866601)

并经 380 V 端口连接到无穷大电网(传输功率为 60 kW),此时将在 375 V 直流侧发生低频振荡。图 2 给出了 375 V 直流母线电压的实际录波的振荡波形,其频率约为 4 Hz。文中将研究这种低频振荡现象。

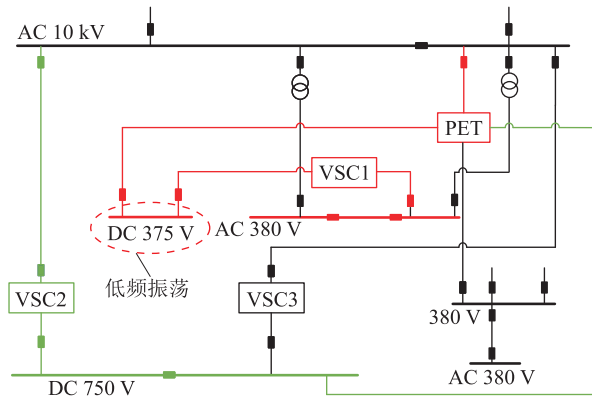


图 1 交直流配电网实际运行

Fig.1 Actual operation of the AC/DC distribution network

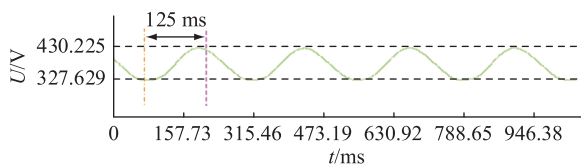


图 2 375 V 直流侧实际振荡波形

Fig.2 Actual oscillation waveform of the 375 V DC side

为了简化系统建模过程,基于一些合理假设,将图 1 的实际物理运行系统简化为图 3 所示的简化模型。图 3 中,A、B、C 号 PET 分别表示图 1 中 ABC 三相 PET 的单体。简化模型假设如下:

(1) 将图 1 中的 VSC2 和 VSC3 合并成 1 台

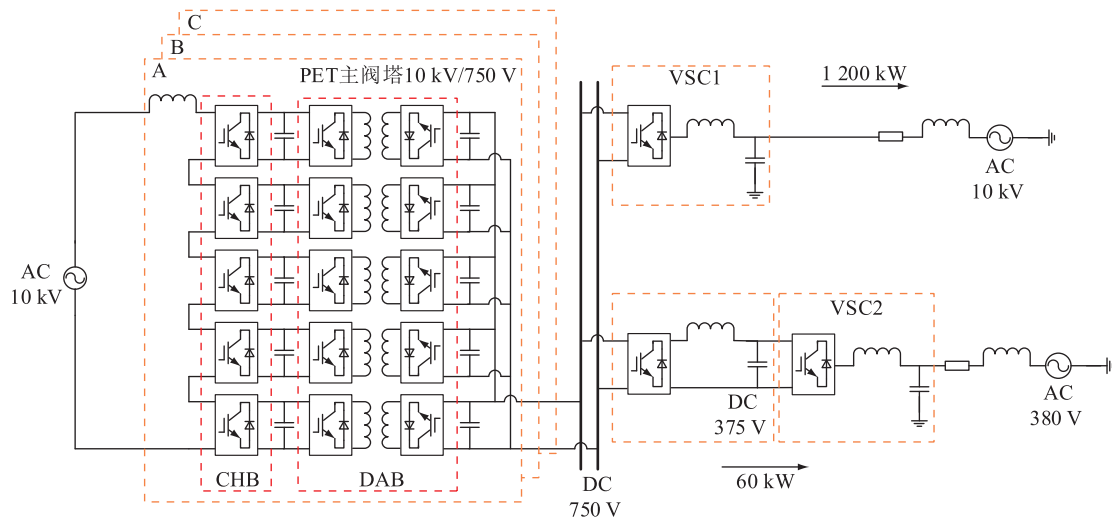


图 3 交直流配电网系统的简化模型

Fig.3 Simplified model of AC/DC distribution network system

VSC 连接 750 V 直流母线和 10 kV 交流母线(图 3 中 2 个 10 kV 电源实为 1 条母线,为方便作图将二者分开,并非实际的电气隔离),因为系统的振荡主要发生在 375 V 直流侧,10 kV 交流母线与 750 V 直流母线间连接的 VSC2 和 VSC3 对振荡的发生影响较小。

(2) 忽略配电变压器对系统的影响,等效到线路阻抗中。

(3) 忽略 PET 的 380 V 交流端口对系统的影响,因为振荡发生时 380 V 交流侧波形正常,故其对振荡的影响也可忽略。

该交直流配电网系统的简化模型共有 4 个端口,交流端口(AC 10 kV、AC 380 V)和直流端口(DC 750 V、DC 375 V)各 2 个。三相 10 kV 交流经过 PET 主阀塔变换成 750 V 直流供给直流公共母线,PET 输入级和中间级采用多级 H 桥串联(cascaded H-bridge, CHB)和隔离型双向有源桥(dual active bridge, DAB)的拓扑结构,每相交流单独控制,经 CHB 整流后再经高频变压器输出。由于级联 H 桥拓扑高度模块化,易于扩展,当选择的级联数合适时,可以在较高的输入电压下使用较低电压等级的器件。对于 H 桥结构的控制相对成熟,无需额外的复杂算法,同时级联结构输出电平数多,谐波特性较好<sup>[9]</sup>。

## 2 各模块的拓扑及控制方式

### 2.1 PET 主阀塔拓扑及控制方法

PET 主阀塔由 CHB 和 DAB 组成,下文将分别进行介绍。

2.1.1 CHB 拓扑和控制结构

CHB 为多级串联的 H 桥结构, H 桥采用电压源型整流器, 将 5 个 H 桥串联起来构成 1 个单相 CHB, 其拓扑如图 4 所示。5 级 H 桥的各个开关管、滤波电容参数一致, 使得高压侧在各 H 桥上的分压一致, 每个开关管承受较小的电压, 这样可以选取耐受电压值较小的开关管, 降低成本。

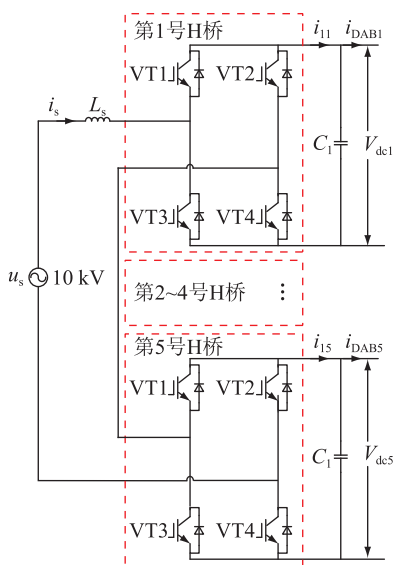


图 4 PET 主阀塔中单相 CHB 拓扑  
Fig.4 Single phase CHB topology in PET main valve tower

该 CHB 中电感和电容的表达式如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} L_s \frac{di_s}{dt} = u_s - 5v_s \\ C_1 \frac{dV_{dc}}{dt} = i_1 - i_{DAB} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_s$  为 CHB 的交流侧滤波电感;  $C_1$  为 H 桥直流侧的滤波电容;  $i_s$  为流过电感的电流;  $u_s$  为单相交流电源;  $v_s$  为 H 桥的输入电压;  $i_1$  为各级 H 桥输出电流矩阵,  $i_1 = [i_{11} \ i_{12} \ i_{13} \ i_{14} \ i_{15}]^T$ ;  $V_{dc}$  为输出直流电压矩阵,  $V_{dc} = [V_{dc1} \ V_{dc2} \ V_{dc3} \ V_{dc4} \ V_{dc5}]^T$ ;  $i_{DAB}$  为各级 DAB 的输入电流矩阵,  $i_{DAB} = [i_{DAB1} \ i_{DAB2} \ i_{DAB3} \ i_{DAB4} \ i_{DAB5}]^T$ 。

CHB 常见的控制方式为直流电压外环和电流内环控制<sup>[19]</sup>, 如图 5 所示。PI 为比例积分控制器; PLL 为锁相环;  $\theta$  为锁相环输出角;  $dq/\alpha\beta$  为坐标变换;  $\omega$  为工频角频率;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为  $u_s$  的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $v_{sd}$ 、 $v_{sq}$  分别为  $v_s$  的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$  分别为  $i_s$  的  $d$ 、 $q$  轴分量。文中,  $x^*$  为对应变量  $x$  的参考值, 如  $V_{dc}^*$  为  $V_{dc}$  的参考值。

电压外环对输出直流电压控制, 将实际电压值与参考值作差, 电压误差经过 PI 控制器得到输入电流  $d$  轴分量的参考值, 电流内环分别对  $d$  轴电流和

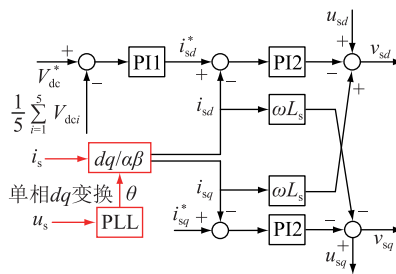


图 5 CHB 控制方式

Fig.5 The control mode of CHB

$q$  轴电流控制, 从而可以调节整流器的有功和无功, 调节功率因数。

理想情况下, CHB 中 5 个 H 桥的各个参数应该完全相同, 这样可以保证 5 个输出电压大小相同。但实际中, 开关管以及电容参数不可能完全一致, 因此须对各级 H 桥采取均压控制。具体方法是: 将各级 H 桥输出电压与参考值比较, 电压误差经过 PI 控制器得到整流桥输入电压  $d$  轴分量的误差  $\Delta v_{sd}$ , 将这部分误差加到控制器输出  $v_{sd}$  上, 以第一个 H 桥为例, 说明均压控制方式, 如图 6 所示。

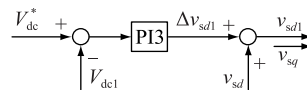


图 6 CHB 均压控制方式

Fig.6 The voltage balance control mode of CHB

2.1.2 DAB 拓扑和控制结构

DAB 为隔离型双有源桥结构, 其拓扑如图 7 所示。隔离级的原边和副边采用完全相同的全桥结构, 即每个 DAB 单元都是由 2 个单相全桥与高频变压器组成。隔离级 DAB 采用双主动全桥移相控制方式, 通过控制变压器两侧电压波形的相位关系来控制功率的大小和流向。

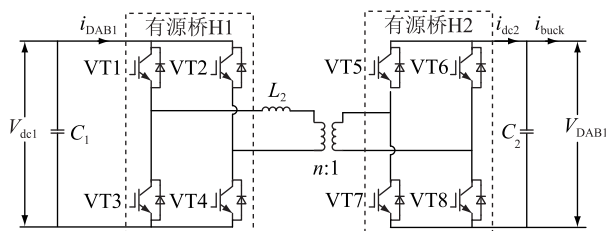


图 7 PET 主阀塔中单相 DAB 拓扑

Fig.7 Single phase DAB topology in PET main valve tower

定义  $d = nV_{DAB1}/V_{dc1}$ , 其中,  $n$  为变压器变比;  $V_{DAB1}$  为单级 DAB 输出电压。当  $d > 1$ , 即  $nV_{DAB1} > V_{dc1}$  时, 变换器工作于 Boost 模式; 当  $d < 1$ , 即  $nV_{DAB1} < V_{dc1}$  时, 变换器工作于 Buck 模式。

文中, DAB 工作在 Buck 模式。由文献[20]可

知,单级 DAB 的传输功率为:

$$P = \frac{nV_{dc1}V_{DAB1}}{2f_sL_2}d_{DAB}(1-d_{DAB}) \quad (2)$$

式中: $f_s$ 为有源桥开关管开关频率; $L_2$ 为变压器原边串联电感值; $d_{DAB}$ 为移相控制中的移相占空比,即  $d_{DAB} = \varphi/2\pi$ , $\varphi$ 为移相角。

单级 DAB 输出端电流为:

$$i_{dc2} = \frac{P}{V_{DAB1}} = \frac{nV_{dc1}}{2f_sL_2}d_{DAB}(1-d_{DAB}) \quad (3)$$

DAB 采用单移相控制,控制器须要得到移相角,具体方法是:将模型中得到的 DAB 输出电压  $V_{DAB1}$  与电压参考值  $V_{DAB1}^*$  作差,将误差经过 PI 控制器得到移相角  $\varphi$ ,将该移相角除以  $2\pi$  即可得到式 (2) 中的移相占空比  $d_{DAB}$ 。控制器如图 8 所示。

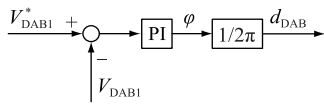


图 8 DAB 控制方式

Fig.8 The control mode of DAB

## 2.2 三相 Buck 变换器拓扑及控制方法

三相 Buck 变换器经 750 V 直流母线连接输出 375 V 直流,其拓扑如图 9 所示。

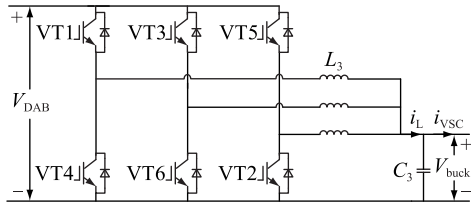


图 9 三相 Buck 变换器拓扑

Fig.9 The topology of the three-phase Buck converter

三相 Buck DC/DC 变换器采用 3 个单相 Buck 电路并联而成,开关管左侧为高压侧,右侧为低压侧,低压侧采用 LC 无源滤波。6 个开关管分为 2 组,上半组和下半组。当电路为 Buck 模式时,下半组开关管恒关断;当电路为 Boost 模式时,上半组开关管恒关断。

在建立数学模型时忽略开关动作过程,各个器件均由数值代替,脉冲宽度调制 (pulse-width modulation, PWM) 发生器也由占空比代替,故输出电压不存在纹波,其数学表达式为:

$$\begin{cases} L_3 \frac{di_L}{dt} = d_{buck} V_{DAB} - V_{buck} \\ C_3 \frac{dV_{buck}}{dt} = i_L - i_{VSC} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $L_3$ 、 $C_3$ 分别为滤波电感和电容; $i_L$ 为流过 Buck 变换器电感的电流; $V_{buck}$ 为 Buck 变换器的输出电

压; $i_{VSC}$ 为流过后一级 VSC 的电流; $d_{buck}$ 为开关函数占空比。三相 Buck 变换器采用电压外环和电流内环控制,Buck 变换器输出电压  $V_{buck}$  与参考值比较,经过 PI 控制器得到电流参考值,再经过 PI 控制器的占空比,最终得到  $d_{buck}$ ,控制方式见图 10。

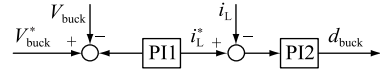


图 10 三相 Buck 变换器控制

Fig.10 The control of the three-phase Buck converter

## 2.3 三相逆变器拓扑及控制方法

该交直流配电网中共有 2 台三相逆变器分别为经 750 V 直流母线变换成 10 kV 交流接无穷大电网和经三相 Buck 变换器输出的 375 V 直流变换成 380 V 接无穷大电网。此处只介绍第二种情况,第一种情况与其类似,其拓扑如图 11 所示。其中, $L_f$ 、 $C_f$ 分别为 VSC 出口的滤波电感和滤波电容; $R_g$ 、 $L_g$ 分别为并网点无穷大电源内电阻和内电感; $e$ 为三相逆变器的内电势; $i_f$ 为流过滤波电感的电流; $u_i$ 为三相逆变器输出端电压; $i_g$ 为并网后流入无穷大电网的电流; $u_g$ 为无穷大电网的电压。

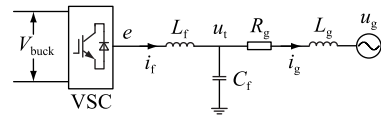


图 11 三相逆变器接无穷大电网拓扑

Fig.11 The topology of three-phase inverter connected to infinite power grid

三相逆变器的输出端滤波电路为 LC 无源滤波,结合控制算法可对输出的波形进行调节,使其输出为工频、谐波含量较小的交流。三相逆变器控制方法如图 12 所示。

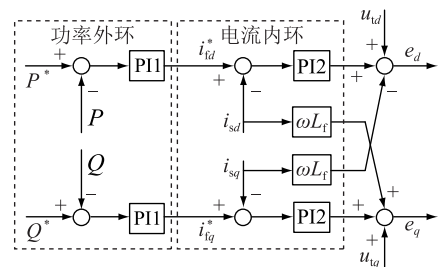


图 12 三相逆变器控制方式

Fig.12 The control block mode of the three-phase inverter

图 12 中, $P$ 、 $Q$ 分别为三相逆变器输入有功和无功功率; $e_d$ 、 $e_q$ 分别为  $e$  的  $d$ 、 $q$  轴分量; $u_{id}$ 、 $u_{iq}$ 分别为  $u_i$  的  $d$ 、 $q$  轴分量; $i_{id}$ 、 $i_{iq}$ 分别为  $i_f$  的  $d$ 、 $q$  轴分量。采用功率外环和电流内环控制。功率外环将有功和无功与指令值比较,经过 PI 控制器得到滤波电感电

流的指令值,  $dq$  轴滤波电感电流除受控制量  $u_{id}$ 、 $u_{iq}$  的控制外, 还受到电流交叉耦合项  $\omega L_f i_{id}$  和  $\omega L_f i_{iq}$  的影响。为了消除电流耦合, 电流内环采用输出滤波电感电压解耦控制, 最终控制器输出内电势  $e_d$ 、 $e_q$  作为电气部分的输入。

有功和无功的计算方法如下。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_{id} + e_q i_{iq}) \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_{id} - e_d i_{iq}) \end{cases} \quad (5)$$

### 3 系统仿真分析

根据第 2 章关于系统拓扑和控制方式的分析, 依照图 3 所示的连接方式, 在 Matlab/Simulink 中搭建该交直流配电网的仿真模型, 并输出各个模块的波形。时域仿真系统主要参数的选取如表 1 所示。

表 1 时域仿真系统主要参数的选取

Table 1 Selection of the main parameters of time-domain simulation system

参数类型	数值
$L_s/\text{mH}$	10
$C_1/\mu\text{F}$	10 000
CHB 电压外环 PI 比例系数、积分系数	10、100
CHB 电流内环 PI 比例系数、积分系数	150、200
$L_2/\text{mH}$	460
$C_2/\mu\text{F}$	10 000
DAB 控制器 PI 比例系数、积分系数	0.02、0.8
$L_f/\text{mH}$	100
$C_f/\mu\text{F}$	1
$R_g/\Omega$	0.1
$L_g/\text{mH}$	0.63
逆变器功率外环 PI 比例系数、积分系数	1、100
逆变器电流内环 PI 比例系数、积分系数	0.7、30
$L_3/\text{mH}$	500
$C_3/\mu\text{F}$	0.1
Buck 变换器电压外环 PI 比例系数、积分系数	5、30
Buck 变换器电流内环 PI 比例系数、积分系数	0.15、320

#### 3.1 系统各模块输出电压波形

CHB 交流输入侧为 10 kV 交流电压, 由于其是由 5 个相同的 H 桥组成, 故每级 H 桥分得 2 kV 交流电压, 经整流得到 2 200 V 直流作为 DAB 的输入, 仿真得到的 CHB 输出电压波形如图 13(a) 所示。CHB 的输出作为 DAB 的输入, 经过 DC/DC 变换, 输出 750 V 直流电压, 仿真波形如图 13(b) 所示。750 V 直流母线接入三相 Buck 变换器输出 375 V 直流电压, 仿真波形如图 13(c) 所示。

为了验证 CHB 的均压控制策略的有效性, 改变第 5 号 H 桥的参数使其与第 1~4 号 H 桥的参数不一致。仿真得到输出波形如图 13(d) 所示, 可知, 当有均压控制时, 即使是 H 桥参数不一致(体现在直流电压初始阶段的波形有偏差), 输出直流电压的稳态值仍能保持一致。

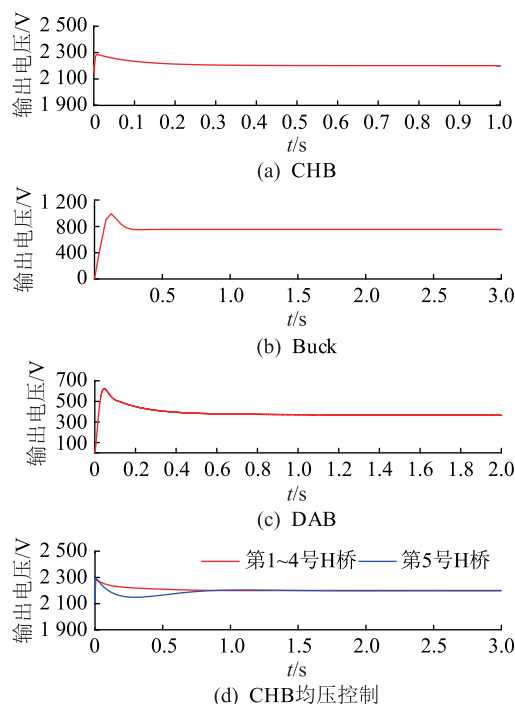


图 13 各模块的输出电压波形

Fig.13 The output voltage waveforms of each module

由以上结果可知, 该仿真模型符合预期要求, 各个模块输出波形稳定, 表明各模块拓扑和控制结构功能有效。

#### 3.2 数学模型正确性验证

在验证数学模型的正确性之前, 首先应建立系统的时域开关模型。时域开关模型为系统的详细模型, 考虑了开关管的动作过程, 可以可靠地仿真实际试验过程, 然而对于复杂的系统而言, 时域开关模型运算时往往会占用计算机大量内存, 从而导致运算速度缓慢。同时, 时域开关模型因考虑了开关管的动作过程, 对后续系统的线性化以及深入研究其机理造成不便。数学模型简化了时域开关模型中开关管的动作过程, 将 PWM 波对开关管的作用以占空比代替, 各个电路元件也同样用数值代替, 极大缓解了计算机内存的占用率, 提高了计算效率, 同时也方便了后续对系统的小信号分析。时域开关模型是验证数学模型正确性的重要依据, 对时域开关模型和数学模型同时施加一小扰动, 若数学模型在小扰动下的响应与时域开关模型保持一致, 则证明了数学模型的正确性。

为了验证所建数学模型正确性,在 Matlab/Simulink 中搭建了详细的时域仿真模型进行对比验证。在系统进入稳态后,对系统中各个模块施加一小扰动,观察在扰动时数学模型与时域模型的响应是否一致,对比结果如图 14 所示,分别为 CHB 输出电压、DAB 输出电压、Buck 变换器输出电压、VSC 输出电压  $d$  轴分量的标么值。

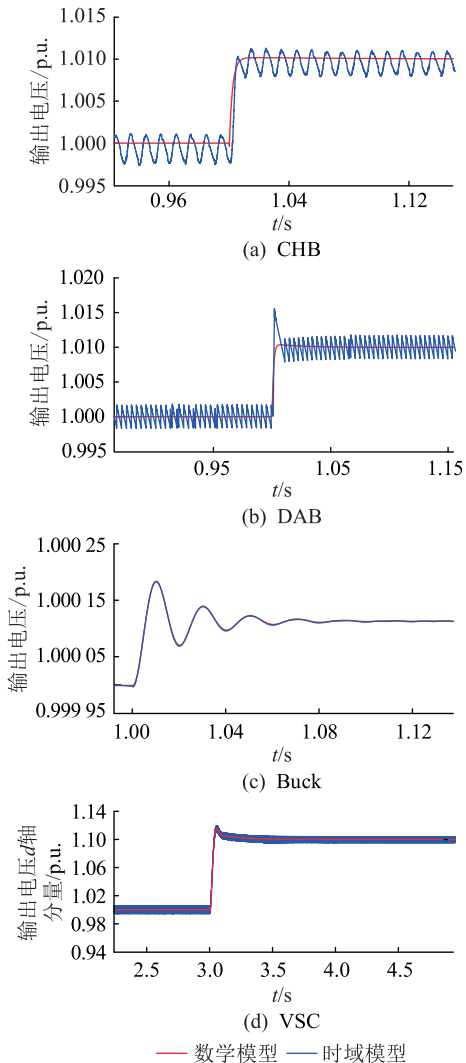


图 14 各模块数学模型与时域模型对比

Fig.14 Comparison between mathematical model and time-domain model of each module

由图 14 对比结果可知,在扰动发生时,数学模型与时域模型的响应一致,验证了文中所建立的含 PET 交直流配电网数学模型的正确性。

### 3.3 振荡波形的复现

在 375 V 直流侧,逐渐增大该侧功率至约 54 kW 时,直流侧将会出现低频振荡现象,振荡频率约为 4 Hz 左右,如图 15 所示。在第 1 章系统的介绍中,实际现场测试时,三相 Buck 变换器侧的功率达到 60 kW 时,低频振荡将会发生,在该简化的仿真

模型中,三相 Buck 变换器侧的功率增大至约 54 kW 时,低频振荡同样会发生。在图 2 的实际录波波形中,低频振荡频率约为 4 Hz,在该简化的仿真模型中,振荡的频率同样为 4 Hz。这说明所建立的含 PET 交直流配电网系统能够有效还原 4 Hz 低频振荡现象,为后续系统的稳定性分析、振荡机理解释和优化控制奠定基础。

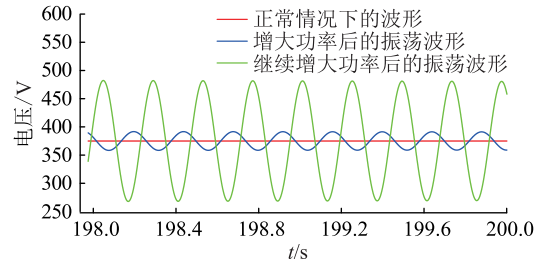


图 15 不同功率下 375 V 直流侧电压波形

Fig.15 The voltage waveforms of the 375 V DC side with different powers

基于当前所建系统,通过参数调节可进行定性分析,发现该直流侧振荡的发生与多种关键因素有关。其中,系统的功率水平对振荡现象的发生起到重要影响。由图 15 可知,当功率从 14 kW(对应红色波形)增加到 53.2 kW(对应蓝色波形)时,375 V 直流侧将发生低频振荡,继续增加至 53.6 kW(对应绿色波形)时,振荡幅度将增大,即 375 V 直流侧的功率越高,越容易出现振荡现象。三相 Buck 变换器的控制参数对直流侧振荡起到重要主导作用。三相 Buck 变换器的控制参数对直流侧振荡起到重要主导作用,如图 16 所示。蓝色波形表示现有参数下的 4 Hz 振荡波形,当电压外环的比例系数由 5 增加到 6 且积分系数由 30 减小到 12 时,375 V 直流侧波形将变成稳定的直流波形(对应黄色波形)。同时电流内环的积分系数还会影响振荡的频率,同样在现有参数下 4 Hz 振荡波形(对应蓝色波形)为例,当电流内环的积分系数由 320 减小到 170 时,振荡频率将变为 2.3 Hz(对应红色波形),即电流内环的积分系数越小,振荡的频率越小。通过上述对一些关键影响因素的定性分析,可为后续系统的稳定性机理分析和稳定性定量分析提供的重要参考。

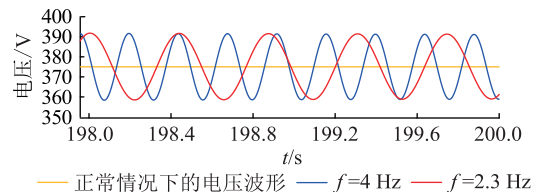


图 16 不同控制器参数下 375 V 直流侧电压波形  
Fig.16 The voltage waveforms of the 375 V DC side with different controller parameters

## 4 结论

文中依托某交直流配电网,基于实际电网测试中发生的直流低频振荡现象,建立了适用于分析该低频振荡现象的含 PET 交直流配电网系统的数学模型,主要结论如下:

(1) 基于实际现场的配电网结构,将该复杂的系统进行简化,该简化模型经过验证证实了其正确性,不仅能够还原实际振荡波形,还提高了计算机的计算效率,加强了对交直流配电网直流侧低频振荡现象的认识。

(2) 分别对该系统的 PET 部分、三相逆变器和三相 Buck 变换器做了梳理,描述了各个模块的拓扑结构以及控制方式,说明了其工作原理及在系统中的作用。

(3) 在 Matlab 平台上建立了其数学仿真模型,得到了各个部分的输出波形。在发生扰动情况下将数学模型的响应与时域模型对比,二者响应一致,从而验证了模型的正确性。

(4) 文中对影响因素进行了定性分析。Buck 变换器功率越大越易发生振荡;Buck 变换器电压外环比例系数增大、积分系数越小,系统越易稳定;Buck 变换器电流内环积分系数越小,振荡频率越小。文中所建立的含 PET 交直流配电网系统能够有效还原 4 Hz 低频振荡现象,为后续对系统的进一步理论分析奠定了基础。

### 致 谢

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目“多端口交直流混合配电网的系统稳定机理研究”(J2020078)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 程亮,黄河,朱磊,等. 交直流配电网的交换功率灵活性提升方法研究[J]. 电力工程技术,2019,38(4):10-17.  
CHENG Liang,HUANG He,ZHU Lei,et al. Method of improving exchange power flexibility between AC/DC distribution network and transmission network[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(4):10-17.
- [2] 陈庆,范栋琛,王晨清,等. 交直流配电网小信号模型和直流侧低频振荡分析[J]. 电力工程技术,2022,41(1):117-125,200.  
CHENQING,FAN Dongchen,WANG Chenqing,et al. Small signal model and DC side low frequency oscillation analysis of AC/DC distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(1):117-125,200.
- [3] WU H,WANG X F. A mode-adaptive power-angle control method for transient stability enhancement of virtual synchronous generators[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics

- in Power Electronics,2020,8(2):1034-1049.
- [4] 司佳,穆云飞,肖迁,等. 基于 PET 控制特性的交直流混合配电网状态估计[J]. 电力系统及其自动化学报,2020,32(12):1-6,25.  
SI Jia,MU Yunfei,XIAO Qian,et al. State estimation of AC/DC hybrid distribution network based on PET control characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(12):1-6,25.
- [5] WANG Z,SU J,CUI Y Y,et al. Research on the structures and application scenarios of medium voltage AC-DC hybrid distribution network[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology,Networking,Electronic and Automation Control Conference (IT-NEC). Chengdu,China. IEEE,2019:743-747.
- [6] 夏杨红,孙勇,韦巍. 光伏接入直流配电网时的功率振荡分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6814-6824,7116.  
XIA Yanghong,SUN Yong,WEI Wei. Power oscillation analysis of PV generators connected to DC distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(23):6814-6824,7116.
- [7] 李子欣,高范强,赵聪,等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(5):1274-1289.  
LI Zixin,GAO Fanqiang,ZHAO Cong,et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(5):1274-1289.
- [8] 庞博,侯丹,李天瑞. 中压多端口电力电子变压器技术研究[J]. 高压电器,2019,55(9):1-9.  
PANG Bo,HOU Dan,LI Tianrui. Analysis of medium voltage multi-port power electronic transformer technology[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(9):1-9.
- [9] 王优,郑泽东,李永东. 中高压电力电子变压器拓扑与控制应用综述[J]. 电工电能新技术,2017,36(5):1-10.  
WANG You,ZHENG Zedong,LI Yongdong. Review of topology and control application of medium and high voltage power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(5):1-10.
- [10] 刘向龙,刘友波,张宸宇,等. 基于电力电子变压器的交直流混合配电网功率-电压协调控制[J]. 电工电能新技术,2019,38(2):35-43.  
LIU Xianglong,LIU Youbo,ZHANG Chenyu,et al. Coordinating voltage regulation for AC-DC hybrid distribution network with multiple power electronic transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2019,38(2):35-43.
- [11] 洪澜,彭勇刚,李悦,等. 计及电力电子变压器的交直流混合配电网能效评估[J]. 电工电能新技术,2019,38(2):72-79.  
HONG Lan,PENG Yonggang,LI Yue,et al. Energy efficiency evaluation of AC/DC hybrid distribution network considering power electronic transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2019,38(2):72-79.
- [12] 张亮,陆永灿,周永荣,等. 一种基于 PET 的交直流混合配电网故障穿越控制策略[J]. 电力电子技术,2019,53(12):81-83.  
ZHANG Liang,LU Yongcan,ZHOU Yongrong,et al. A control

- strategy of fault ride through for AC/DC hybrid distribution network based on PET[J]. *Power Electronics*, 2019, 53(12): 81-83.
- [13] LIU Y, LI H B, YU Z Q, et al. Reliability evaluation method for AC/DC hybrid distribution power network considering cascaded multiport power electronic transformer[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(23): 5357-5364.
- [14] ZHAO W Z, ZHENG J H, HAN Z H, et al. Large-disturbance stability analysis method based on mixed potential function for AC/DC hybrid distribution network with PET[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(18): 3802-3813.
- [15] YU Z Q, WANG X R, QU L, et al. DC side over-voltage characteristics analysis of AC/DC hybrid distribution power system [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 133248-133257.
- [16] 刘朋, 贾燕冰, 韩肖清. 含双有源全桥变换器多电压等级直流配电网潮流分析与计算[J]. *电网技术*, 2021, 45(2): 741-751.
- LIU Peng, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing. DAB-based power flow analysis and calculation for multi-voltage grades DC distribution network[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(2): 741-751.
- [17] 王一, 侯成, 程旭, 等. 交直流混合配电网控制保护技术研究与应用[J]. *广东电力*, 2020, 33(12): 90-101.
- WANG Yi, HOU Cheng, CHENG Xu, et al. Research and application of control and protection technology for AC-DC hybrid distribution network[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(12): 90-101.
- [18] 李光辉, 王伟胜, 郭剑波, 等. 风电场经 MMC-HVDC 送出系统宽频带振荡机理与分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(18): 5281-5297, 5575.
- LI Guanghui, WANG Weisheng, GUO Jianbo, et al. Broadband oscillation mechanism and analysis for wind farm integration through MMC-HVDC system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(18): 5281-5297, 5575.
- [19] 李小栋. H 桥级联型电力电子变压器的控制系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- LI Xiaodong. Research on control system of H-bridge cascaded power electronic transformer [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [20] 谷泓杰. 隔离型双向全桥 DC-DC 变换器研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- GU Hongjie. Research on isolated bidirectional full-bridge DC-DC converter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

#### 作者简介:



范栋琛

范栋琛(1993),男,硕士,工程师,从事电力系统交直流配电网稳定性研究工作(E-mail: fdctc@163.com);

张宸宇(1989),男,博士,高级工程师,从事微电网电能质量治理工作;

姜云龙(1994),男,硕士,工程师,从事交直流配电网研究工作。

## Analysis for low frequency oscillation on the DC side of AC/DC distribution network based on PET control characteristics

FAN Dongchen<sup>1</sup>, ZHANG Chenyu<sup>1</sup>, JIANG Yunlong<sup>1</sup>, LIU Wenkai<sup>2,3</sup>, YUAN Yubo<sup>1</sup>, YUAN Xiaoming<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310016, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With the development of new energy, energy storage, and flexible DC technology, AC/DC hybrid distribution networks have gradually become an important development direction for future distribution networks. The access of a large number of power electronic devices has brought dynamic problems such as low frequency oscillations to the distribution network. In order to deeply study the low frequency oscillation problem on the DC side of AC/DC distribution networks, detailed modeling of key links is conducted such as H-bridge series and isolated bidirectional active bridge structures, three-phase inverters, and three-phase Buck converters in the main valve tower of power electronic transformer. Through time domain simulation, the 4 Hz low frequency oscillation phenomenon on the DC side of the AC/DC distribution network in the actual project is reproduced, and the correctness of the established mathematical model is verified. Based on the established mathematical model, qualitative analysis is conducted on key influencing factors such as power and controller parameters, and the final conclusions are as follows: power level and Buck link voltage loop control parameters affect system stability, the integral coefficient of the current loop in the Buck link affects the oscillation frequency.

**Keywords:** AC/DC distribution network; power electronic transformer; low frequency oscillation; three-phase Buck converters; time domain simulation; causes of oscillation

(编辑 吴昊)