

# 基于占空比主动调节的钳位开关电容型 DC/DC 解耦控制策略

孟祥有<sup>1</sup>, 梁帅<sup>1</sup>, 孙谦浩<sup>2</sup>, 孟经伟<sup>2</sup>

(1. 国网通辽供电公司, 内蒙古 通辽 028000; 2. 清华大学 电机系, 北京 100084)

**摘要:** 钳位开关电容型 DC/DC (Clamping Switched Capacitors-based DC/DC, CSC) 是构建具有直流故障自清除能力直流变压器的有效模块。由于传统控制策略下的 CSC 中直流电压与电容电压存在着耦合效应, 直流电压的变化将直接引起电容电压与交流环节电压幅值的变化, 使得 CSC 在两端直流电压不匹配时可能发生软开关丢失、电流应力增大、功率损耗增加等运行性能下降的现象。鉴于此, 为改善 CSC 在直流电压不匹配时的开关及效率性能, 提出了一种基于可变占空比的 CSC 电容电压解耦控制策略。该策略可以在 CSC 的整个运行范围内保证交流电压幅值的自动匹配, 对于改善 CSC 的整体运行性能具有明显效果。基于试验样机, 验证了所提控制策略的正确性与有效性。

**关键词:** 钳位开关电容型 DC/DC, 解耦控制, 电流应力, 软开关

**DOI:** 10.19753/j.issn1001-1390.2024.05.029

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2024)05-0212-06

## Decoupled control strategy based on duty-ratio active regulation for clamping switched capacitors-based DC/DC application

MENG Xiangyou<sup>1</sup>, LIANG Shuai<sup>1</sup>, SUN Qianhao<sup>2</sup>, MENG Jingwei<sup>2</sup>

(1. State Grid Tongliao Power Supply Company, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China.

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The clamping switch capacitor-based DC/DC (CSC) is an effective module to construct the DC transformer with the capability of DC faults clearing. However, the voltage amplitude of capacitor and AC-link will be influenced directly by the change of DC voltages in the traditional control of CSC because of the coupling effect of DC voltage and capacitor voltage, thus the loss of soft-switching, the increase of current stress and power loss may occur when the DC voltages are unmatched. In view of this issue, a capacitor voltage decoupled control strategy based on the variable duty-ratio is presented for CSC to improve the switching and efficiency performance when the DC voltage is unmatched. The proposed control strategy can guarantee the amplitude of AC voltages is matched in the full-operating-range of CSC automatically, so the efficiency of CSC can be enhanced obviously. The correctness and effectiveness of the proposed control strategy are validated by the prototype.

**Keywords:** clamping switch capacitor-based DC/DC, decoupled control, current stress, soft-switching

## 0 引言

直流变压器是配电网直流化过程中<sup>[1-2]</sup>必不可少的关键设备之一<sup>[3-4]</sup>, 其主要作用是完成直流配电网中母线的连接与功率的传输<sup>[5-7]</sup>。目前为止, 直流变压器仍处于拓扑探讨与示范工程运行的初级发展阶段<sup>[8-9]</sup>。

基于已有的研究, 典型的直流变压器拓扑方案为基于输入串联-输出并联型 (Input-Series-Out-Parallel, ISOP) 的双主动全桥 (Dual-Active -Bridge,

DAB) 结构<sup>[10-12]</sup>。然而, 由于 DAB 中集中电容的存在, ISOP-DAB 型直流变压器需要直流断路器的配合才能完成对直流故障的清除<sup>[13-14]</sup>, 延长了直流配电网的故障清除时间, 增加了直流配电网的建设成本, 降低了直流配电网的供电可靠性<sup>[15]</sup>。与此同时, 处于热备用状态下的冗余子模块在 ISOP-DAB 型直流变压器中并不能够被设计<sup>[16]</sup>, 降低了直流变压器系统自身的应用可靠性。事实上, 没有冗余功能的电气设备通常并不能进行并网应用。鉴于此, 探索能够实现直流故障自清除的 DC/DC 子模块并成为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52307210)

直流变压器技术近期的研究热点与难点<sup>[17-18]</sup>。

文献[19]给出了一种有效的具有故障自清除功能的直流变压器方案,并指出该方案的核心是钳位开关电容型 DC/DC(CSC)的应用。然而,该文献中对 CSC 的控制方法沿用了 DAB 中的方波移相控制<sup>[20]</sup>,使得 CSC 的电容电压与端口直流电压具有了耦合效应。在直流端口电压与交流变压器变比不匹配时,上述耦合效应将严重影响到 CSC 的开关及应力性能,降低整体的运行效率。也就是说,传统的方波移相并未能充分发挥 CSC 的结构优势。

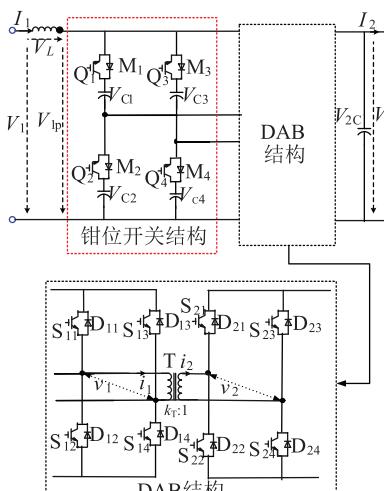
鉴于上述背景,本文提出了一种 CSC 的电容电压解耦控制策略,并对该策略的有效性进行了详细的验证。研究结果表明,在直流端口电压不匹配时,所提的控制策略能够有效提升 CSC 的整体运行性能,具有良好的工程价值。

## 1 CSC 的电容电压解耦控制策略

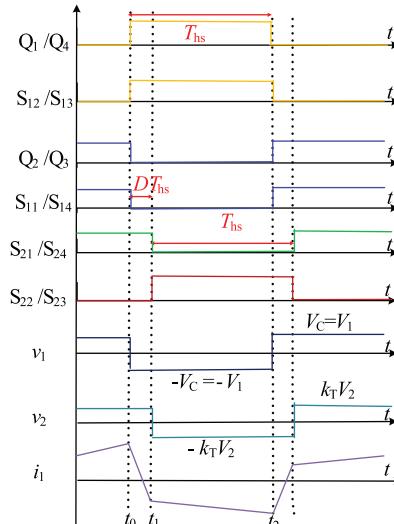
### 1.1 传统移相控制下 CSC 的性能限制

如图 1(a)所示,给出了 CSC 的拓扑结构。在 CSC 中,钳位开关电容结构主要完成与直流母线的交互,DAB 结构则负责完成功率的主体传输,且具体的功率传输特性与钳位开关结构和 DAB 均密切相关。如图 1(b)所示,给出了文献[7]中所涉及的 CSC 的传统移相控制原理,图中, $T_{hs}$ 为半个开关周期, $D$ 为 CSC 的移相率。

在传统移相控制下,所有开关的调制比均固定在 50%,且开关管  $Q_1, Q_4, S_{12}, S_{13}$  为调制波相同的一组开关器件组,开关管  $Q_2, Q_3, S_{11}, S_{14}$  为调制波相同的另一组开关器件组,两个开关器件组之间的移相角为 180 度。根据图 1(b)中交流电压与电流的关系可知,传统移相控制策略下 CSC 的功率传输主要依靠交流变压器两侧电压的移相率  $D$  来实现。



(a) CSC 的拓扑结构



(b) CSC 的传统移相控制策略

图 1 CSC 的拓扑结构与传统控制策略

Fig. 1 Topology and traditional control strategy of CSC

在传统移相控制下,CSC 中四个电容的稳态电压值均与  $V_1$  的电压值相等,从而造成交流侧电压幅值与直流侧电压的耦合关系。具体地,交流环节的电压、电流以及功率标么值可以表示为:

$$\begin{cases} v_1(t) = \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{n_T}{k} \sin(kw_0t) \\ v_2(t) = \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k} \sin[k(w_0t - D\pi)] \\ i_1(t) = \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} [\cos[k(w_0t - D\pi)] - n_T \cos(kw_0t)] \\ P = \sum_{k=1,3,5,\dots} P_k = \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{n_T}{k^3} \sin(kD\pi) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $w_0 = \pi/T_{hs}$  为开关角频率,  $n_T = V_1/k_T V_2$  为 CSC 的交流电压幅值匹配参数。当  $n_T = 1$  时,表示直流电压比与交流隔离变压器变比匹配,  $n_T$  越远离 1, 表示二者的匹配度越低。

同时,式(1)中各电气量标么化的基准值分别为:

$$V_B = \frac{4k_T V_2}{\pi} I_B = \frac{4k_T V_2}{\pi w_0 L} P_B = \frac{8(k_T V_2)}{\pi^2 w_0 L} \quad (2)$$

基于图 1(b)与式(1)可知,交流环节电流的电流应力(最大电流幅值)标么值可表示为:

$$i_{L_{Cs}} = |i_{L_{max}}| = |i_{L_{min}}| = \begin{cases} \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} [n_T - \cos(kD\pi)] & n_T \geq 1 \\ \sum_{k=1,3,5,\dots} \frac{1}{k^2} [1 - n_T \cos(kD\pi)] & n_T < 1 \end{cases} \quad (3)$$

基于式(1)中的功率与式(3)中的电流应力,可以得到电流应力与传输功率以及交流电压幅值匹配参数之间的函数关系图像如图 2 所示。

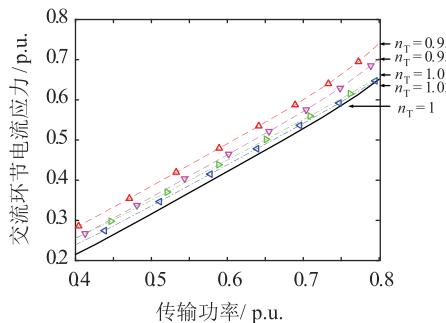


图 2 传统控制下 CSC 的电流应力特征  
Fig. 2 Current stress characteristic of CSC with the traditional control

根据图 2 可知,当传输功率一致时,随着交流电压幅值匹配比对 1 的远离,CSC 交流环节电流的电流应力逐渐增大。由于 CSC 的交流环节无功功率、功率损失、开关器件电流应力均与交流环节电流应力成正比,因此在交流电压幅值匹配比远离 1 的同时,意味着 CSC 的交流功率因数,开断电流损失以及效率逐渐减小。也就是说,由于传统控制下的 CSC 电容电压不能够被主动的控制,造成其交流电压幅值与直流电压存在耦合关系。该耦合关系在直流端口电压发生变化时(由于直流配电网线路中阻抗的存在,CSC 的中压侧端口电压随着传输功率的变化必然会发生波动,通常认为该波动在 5% 以内)会造成 CSC 传输效率的下降,未能充分发挥 CSC 的效率性能。鉴于此,提出新的能够保证 CSC 较宽电压范围内效率的控制方法对于促进其进一步应用具有重要作用。

### 1.2 CSC 的电容电压解耦控制策略

如图 3 所示,给出了本文所提的 CSC 的电容电压解耦控制策略(Decoupled Control Strategy, DCS)的运行原理图与关键电气量波形(以  $n_T < 1$  为例)。

比较图 1(b)与图 3(a)的关键电气量波形可知,DCS 与传统移相控制的主要不同之处在于 CSC 中  $V_1$  侧的控制策略不同。在 DCS 中, $V_1$  侧各开关的调制波占空比不再为固定的 50%,而是随着 CSC 交流电压幅值匹配参数  $n_T$  的变化而实时变化,从而实现交流电压幅值与直流电压之间的解耦。

具体地,假设所插入的解耦占空比为  $M$ ,则开关器件  $Q_1 \sim Q_4$  的占空比为  $(1 - M)$ ,开关器件  $S_{11} \sim S_{14}$  的占空比为  $(1 + M)$ 。其中,解耦占空比  $M$  的取值与  $n_T$  密切相关,具体分析如下。

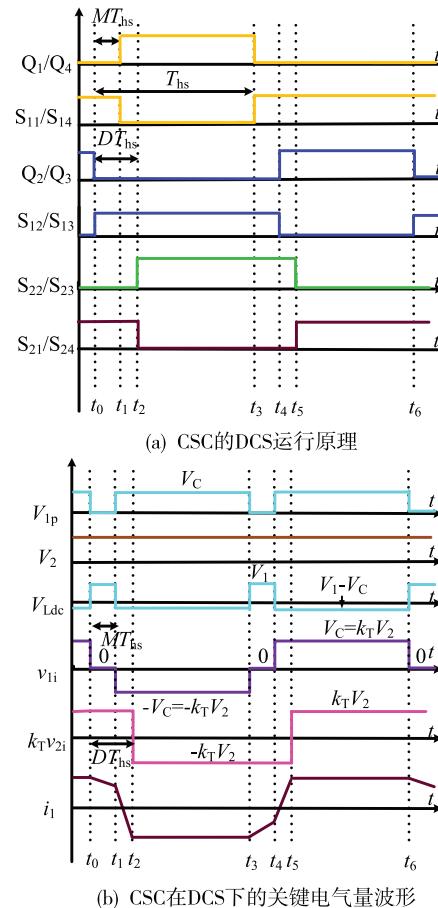


图 3 CSC 的 DCS 运行原理与关键电气量波形  
Fig. 3 Operation principle and key electrical quantity waveforms of CSC with the DCS

根据图 3(b)可知,在 DCS 中,一个周期内  $V_1$  侧电感后端电压可以表示为:

$$V_{1p} = \begin{cases} 0 & [t_0, t_1] \text{ and } [t_3, t_4] \\ V_c & [t_1, t_3] \text{ and } [t_4, t_6] \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $V_c$  为 CSC 中  $V_1$  侧开关电容的稳态电压值。在 DCS 中,该值与  $M$  的取值密切相关。

同时,一个周期内 CSC 中交流电压可以表示为:

$$\begin{cases} v_1 = \begin{cases} 0 & [t_0, t_1] \text{ and } [t_3, t_4] \\ -V_c & [t_1, t_3] \\ V_c & [t_4, t_6] \end{cases} \\ v_2 = \begin{cases} k_T V_2 & [t_0, t_2] \text{ and } [t_5, t_6] \\ -k_T V_2 & [t_2, t_5] \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

在 CSC 中,直流电感前端的电压始终为  $V_1$ ,因此基于式(4),加在电感上的电压为:

$$V_L = \begin{cases} V_1 & [t_0, t_1] \text{ and } [t_3, t_4] \\ V_1 - V_c & [t_1, t_3] \text{ and } [t_4, t_6] \end{cases} \quad (6)$$

由于直流电感在一个周期内的平均电压降为

0,因此有:

$$(1 - M)(V_1 - V_C) + MV_1 = 0 \quad (7)$$

即:

$$V_C = \frac{V_1}{1 - M} \quad (8)$$

由式(5)与式(8)可知,在 DCS 中,由于解耦占空比  $M$  的加入,CSC 可以根据需要主动对直流电容的电压进行控制与调节,从而改变交流环节的电压幅值与电流大小。

令式(8)中电容电压值等于式(5)中  $v_2$  的电压幅值,可得:

$$M = 1 - \frac{V}{k_T V_2} = 1 - n_T \quad (9)$$

也就是说,在 DCS 中,只需要实时测量 CSC 两端的直流电压即可保证交流环节电压幅值的匹配。

在式(9)的控制下,DCS 下 CSC 的交流电压为:

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = \begin{cases} 0 & [0, MT_{hs}] \\ -k_T V_2 & [MT_{hs}, T_{hs}] \\ 0 & [T_{hs}, (1 + M)T_{hs}] \\ k_T V_2 & [(1 + M)T_{hs}, 2T_{hs}] \end{cases} \\ v_2 = \begin{cases} k_T V_2 & [0, DT_{hs}] \\ -k_T V_2 & [DT_{hs}, (1 + D)T_{hs}] \\ k_T V_2 & [(1 + D)T_{hs}, 2T_{hs}] \end{cases} \end{array} \right. \quad (10)$$

由式(10)可知,当直流电压匹配时,解耦控制与传统控制是等效的。同时,考虑到交流环节电流的对称性,DCS 下 CSC 的交流环节电流与传输的有功功率可以表示为式(11):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1(t) = \begin{cases} \frac{k_T V_2 T_{hs}}{2L}(2D - 1 + n_T) - \frac{k_T V_2}{L}t, & t \in [0, MT_{hs}] \\ \frac{k_T V_2 T_{hs}}{2L}(2D - 3 + 3n_T) - \frac{2k_T V_2}{L}(t - 1 + n_T T_{hs}), & t \in [MT_{hs}, DT_{hs}] \\ \frac{k_T V_2 T_{hs}}{2L}(1 - n_T - 2D) & t \in [DT_{hs}, T_{hs}] \end{cases} \\ P_{DCS} = \frac{(k_T V_2)^2 T_{hs} [2D - 1 + n_T - D^2 - (D - 1 + n_T)^2]}{2L} \end{array} \right. \quad (11)$$

根据图 3(b),式(2)及式(11)可知,DCS 下 CSC 的功率及交流电流应力标么值为:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{DCS} = \frac{\pi}{16} [2D - 1 + n_T - D^2 - (D - 1 + n_T)^2] \\ i_{1\_cs\_DCS} = \frac{\pi^2}{8} (2D - 1 + n_T) \end{array} \right. \quad (12)$$

基于式(3)与式(12),传统控制与 DCS 下 CSC 的交流电流应力标么值比较曲线如图 4 所示。无论是在 DCS 还是传统移相控制中,随着传输功率的增大,交流环节的电流应力均会增加。然而,在传输功率相同时,DCS 下的交流环节电流应力始终低于传统移相控制下的电流应力,说明 DCS 能够直接地提高 CSC 的电流性能,并间接地改善效率性能。同时,从图 4 中可知,传统控制下的交流电流应力对交流电压幅值匹配参数  $n_T$  的变化比较敏感,而 DCS 中,  $n_T$  对交流电流应力的影响明显减弱,这是由于 DCS 中交流电压幅值与直流电压实现了解耦的原因。

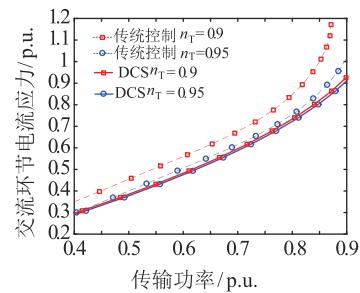


图 4 传统控制与 DCS 的交流电流应力比较分析

Fig. 4 Comparison analysis of current stress of CSC under the traditional control and the DCS

## 2 实验验证

为了验证本文所提 CSC 解耦控制策略的正确性与有效性。在实验室搭建了 CSC 的样机。如表 1 所示,给出了实验验证的基本参数。

表 1 CSC 实验参数表

Tab. 1 Experiment parameters table of CSC

参数	数值	参数	数值
$V_1$ 实验值	150 V/120 V	直流电感	1.5 mH
$V_2$ 实验值	150 V	交流变压器漏感	80 mH
高频变压器变比	1:1	开关频率	20 kHz

如图 5 与图 6 所示,分别给出了  $V_1 = 150$  V,  $V_2 = 150$  V 与  $V_1 = 120$  V,  $V_2 = 150$  V 时 CSC 在本文所提 DCS 下的实验波形。

从图 5(a)与(b)中可知,当  $V_1 = 150$  V =  $k_T V_2 = 150$  V(直流端电压匹配)时,解耦控制策略下的 CSC 与传统控制策略下的 CSC 运行波形相同,即钳位开关结构的输出电压为直流 150 V,电容电压为 150 V,且高频链电压为不含 0 电平的方波,验证了理论分析的正确性。

然而,当  $V_1 = 120$  V ≠  $k_T V_2 = 150$  V(直流端电压不匹配)时,从图 6(a)中可知,虽然  $V_1$  侧的直流电压为 120 V,但由于解耦占空比  $M$  的存在,电容电压均为 150 V,且钳位开关结构的输出电压  $V_{1_p}$  则为

占空比为 0.8 的矩形波而不是一条直线。同时, 钳位开关结构的输出矩形波的幅值为电容电压 150 V, 验证了理论分析的正确性。图 6(b)给出了 CSC 的高频链运行波形, 从中可知, CSC 的交流电压  $v_1$  不再为方波, 而是含有 0 电平的三电平波, 这与理论分析是一致的。

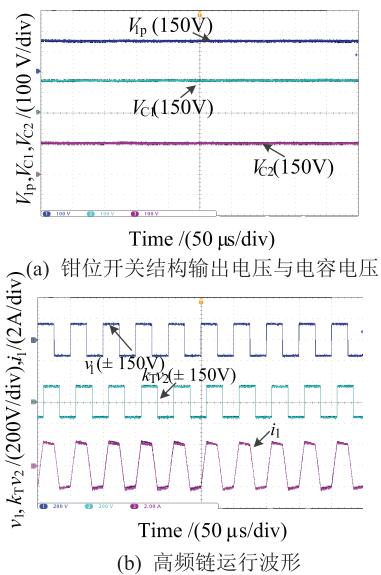


图 5 电压匹配时解耦控制下 CSC 实验结果  
Fig. 5 Experimental results of CSC using DCS when  $V_1 = 150 \text{ V}, V_2 = 150 \text{ V}$

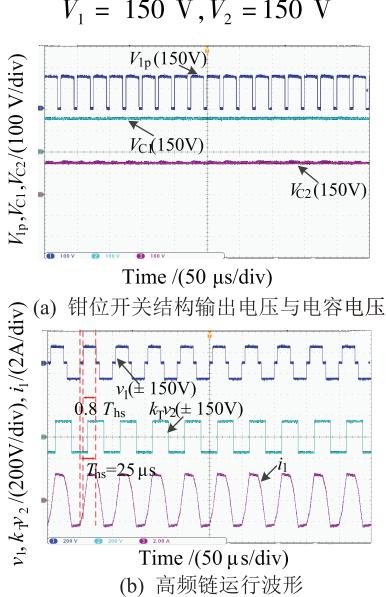


图 6 电压不匹配时解耦控制下 CSC 实验结果  
Fig. 6 Experimental results of CSC using DCS when  $V_1 = 120 \text{ V}, V_2 = 150 \text{ V}$

图 7 给出了  $V_1 = 120 \text{ V} \neq k_T V_2 = 150 \text{ V}$  (直流端电压不匹配)时, 解耦控制与传统控制传输不同功率时的效率比较曲线。从中可知, 相比于传统控制策略, 在直流端电压不匹配时, 解耦控制始终具有

更高的效率。同时, 在直流电压匹配时, 由于解耦控制与传统控制是等效的, 因此上述实验结果也说明解耦控制策略具有更好的综合效率, 验证了理论分析的正确性。

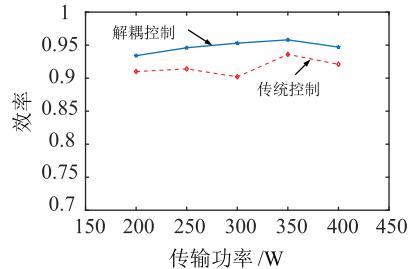


图 7 电压不匹配时不同控制下的效率比较  
Fig. 7 Efficiency comparison for the different control strategies when  $V_1 = 120 \text{ V}, V_2 = 150 \text{ V}$

### 3 结语

为了提高钳位开关电容型 DC/DC 在直流端电压不匹配时的运行性能, 本文提出了一种基于变占空比的电容电压解耦控制策略, 并通过理论分析与实验验证说明了所提解耦控制策略的正确性与有效性。本文的工作对于进一步促进直流变压器的发展具有一定的工程意义, 有利于推进钳位开关电容型 DC/DC 的进一步应用与发展。

### 参 考 文 献

- [1] 金恩淑, 杨筱凡, 于新, 等. MMC-HVDC 直流侧极间短路暂态特性分析[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 30-37.  
JIN Enshu, YANG Xiaofan, YU Xin, et al. Transient characteristics analysis of DC side short circuit of mme-hvdc [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 30-37.
- [2] 王子昂, 孟润泉, 韩肖清. 微电网与配电网间串联补偿变压器直流偏磁抑制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 127-133.  
WANG Ziang, MENG Runquan, HAN Xiaoqing. Research on DC bias suppression strategy of series compensation transformer between micro-grid and distribution network [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 127-133.
- [3] ZHAO B, et al. A more prospective look at IGCT: Uncovering a promising choice for dc grids[J]. IEEE Ind. Electron. Mag., 2018, 12(3): 6-18.
- [4] 叶耀, 龚锦霞, 李琛舟, 等. 一种考虑分布式电源的配电自动化系统规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 109-115.  
YE Yao, GONG Jinxia, LI Chenzhou, et al. A planning method for distribution automation system considering distributed generation [J]. Smart Power, 2022, 50(10): 109-115.
- [5] 孙谦浩, 王裕, 宋强, 等. 应用于直流配电网的双向全桥直流变换器比较分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 49-56.  
SUN Qianhao, WANG Yu, SONG Qiang, et al. Analysis and comparison of dual-active-bridge DC/DC converters in DC distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 49-56.
- [6] 刘洋, 董锋斌, 皇金峰. 交错并联三绕组耦合电感高增益 Boost 变换器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(18): 177-187.  
LIU Yang, DONG Fengbin, HUANG Jinfeng. High step-up boost

- verter with an interleaved and three-winding coupled inductor [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(18): 177-187.
- [7] 吴振军, 谢欢, 代东任, 等. T 型三电平网关变换器电流重构模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 117-124. WU Zhenjun, XIE Huan, DAI Dongren, et al. Model predictive control strategy for current reconstruction of a T-type three-level grid-tied converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 117-124.
- [8] 周念成, 张渝, 廖建权, 等. 计及直流变压器控制的多电压等级双极直流配电网线性潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2070-2084. ZHOU Niancheng, ZHANG Yu, LIAO Jianquan, et al. Linearization formulation based power flow calculation of multiple-voltage grades bipolar DC distribution network considering control modes of DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2070-2084.
- [9] 赵宏成, 张旭航, 曹炜, 等. 特高压变压器中性点经小电抗接地及其过电压保护研究[J]. 陶瓷避雷器, 2022(3): 109-115. ZHAO Hongcheng, ZHANG Xuhang, CAO Wei, et al. Research on neutral point grounded by small reactance and its overvoltage protection of UHV transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 109-115.
- [10] 蔺晓强. 多电压等级直流微电网中多端口变换器与直流变压器研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- LAN Xiaoqiang. Research on multi-port converter and DC transformer in multi-voltage levels DC microgrids[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [11] 费冬青. PCB 供电用 Buck 变换器的参数设计[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(12): 13-16. FEI Dongqing. Parameter design of buck converter for pcb power supply[J]. Techniques of Automation and Application, 2022, 41(12): 13-16.
- [12] 张帆, 辛德锋, 柳龙, 等. 适用于光伏直流并网发电的 DC/DC 变换器研究[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(9): 8-12, 16. ZHANG Fan, XIN Defeng, LIU Long, et al. Research on DC/DC converter apply to photovoltaic dc grid-connected power generation [J]. Techniques of Automation and Application, 2022, 41(9): 8-12, 16.
- [13] ZHAO B, SONG Q, LIU W, et al. Overview of dual-active-bridge isolated bidirectional DC-DC converter for high-frequency-link power conversion system[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2014, 29(8): 4091-4106.
- [14] 安国庆, 史哲文, 马世峰, 等. 基于 RF 特征优选的 WOA-SVM 变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 171-178. AN Guoqing, SHI Zhewen, MA Shifeng, et al. Fault diagnosis of WOA-SVM transformer based on RF feature optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 171-178.
- [15] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2241-2254. NIAN Heng, KONG Liang. Overview of DC microgrid fault protection technology research[J]. High Voltage Technology, 2020, 46(7): 2241-2254.
- [16] STEFAN P. ENGEL, MARCO STIENEKER, NILS SOLTAU, et al. Comparison of the modular multilevel DC converter and the dual-active bridge converter for power conversion in HVDC and MVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 30(1): 124-137.
- [17] 林智钦, 王志冰, 杨晓峰, 等. 模块化多电平高压 DC/DC 变换器的电感参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2470-2477. LIN Zhiqin, WANG Zhibing, YANG Xiaofeng, et al. Inductance parameter design for modular multilevel high voltage DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE. 2016, 36(9): 2470-2477.
- [18] 吴晓文, 张壮壮, 祝令瑜, 等. 负载因素对 10 kV 三相油浸式配电变压器振动特性影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 106-115. WU Xiaowen, ZHANG Zhuangzhuang, ZHU Lingyu, et al. Simulation research on influence of load factors on vibration characteristics of 10 kV three phase oil immersed distribution transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 106-115.
- [19] 孙谦浩, 李亚楼, 王静, 等. 基于钳位开关电容的高频模块化直流变压器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3633-3642. SUN Qianhao, LI Yalou, WANG Jing, et al. High-frequency modular DC transformer based on clamping switched capacitors [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3633-3642.
- [20] 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 of multi-voltage grades DC distribution network[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 741-751.

## 作者简介:



孟祥有(1991—),男,工程师,硕士,研究方向为电力系统关键设备及其保护技术。

Email:tlmengxiangyou@163.com

梁帅(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为电力系统关键设备及其保护技术。

孙谦浩(1993—),男,通信作者,博士,博士后,助理研究员,研究方向为交、直流输配电及其关键大功率换流器技术。

Email:sxsunqian@163.com

孟经伟(1991—),男,博士研究生,研究方向为交、直流输配电及其关键大功率换流器技术。

收稿日期:2021-08-17;修回日期:2022-12-30

(王克祥 编发)