

模块化多电平变换器全桥型子模块 优化均压控制方法^{*}

刘道正¹, 金鑫¹, 游坤奇¹, 刘罗², 刘西蒙², 易灵芝²

(1. 湖南电器科学研究院有限公司, 湖南长沙 410009;

2. 湘潭大学自动化与电子信息学院 湖南省多能源协同控制技术工程研究中心, 湖南湘潭 411105)

摘要: 模块化多电平变换器(MMC)子模块(SM)的数量与直流侧电压成正比, 当SM增加时, 会导致MMC的开关损耗急剧增加, 因此降低功率器件的开关频率一直是MMC的重要研究方向之一。采用最近电平逼近调制(NLM)方式, 提出一种基于全桥型SM的改进均压排序法, 旨在降低MMC中功率器件IGBT的开关频率, 该方法实现相对简单, 无需额外的控制器, 且易于扩展。最后, 通过在MATLAB/Simulink平台搭建了19个全桥SM的仿真模型, 验证了该方法的有效性。验证了所提全桥型SM优化均压策略, 可以有效避免IGBT不必要的反复投切, 降低IGBT的开关损耗, 同时对外部输出特性不会产生负面影响。

关键词: 模块化多电平变换器; 改进均压排序法; 开关损耗; 全桥子模块

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)03-0075-06

doi: 10.12177/emca.2020.219

Optimization of Voltage Sharing Control Method for Full-Bridge Sub-Module of Modular Multilevel Converter^{*}

LIU Daozheng¹, JIN Xin¹, YOU Kunqi¹, LIU Luo², LIU Ximeng², YI Lingzhi²

(1. Hunan Electrical Apparatus Research Institute Co., Ltd., Changsha 410009, China;

2. School of Automation and Electronic Information, Hunan Province Cooperative Innovation Center for Wind Power Equipment and Energy Conversion, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: The number of modular multilevel converter (MMC) sub-modules (SMs) is proportional to the voltage of DC side. When the SM number increases, the switching loss of MMC will increase sharp, so reducing the switching frequency of power devices has been an important research direction of MMC. The nearest level modulation (NLM) is adopted and an improved equal-voltage ranking method based on a full-bridge SM is proposed, aiming to reduce the switching frequency of IGBT in MMC. This method is relatively simple, requires no additional controller and is easy to be extended. Then, 19 simulation models of full-bridge SM are built on MATLAB/Simulink platform to verify the effectiveness of the method. It is verified that the proposed full-bridge SM optimization voltage-sharing strategy can effectively avoid unnecessary repeated switching of IGBT, reduce the switching loss of IGBT, and have no negative effects on the external output characteristics.

Key words: modular multilevel converter; improved equal-voltage ranking method; switching loss; full-bridge sub-module

收稿日期: 2020-12-07; 收到修改稿日期: 2021-01-15

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61572416); 湖南省自科基金株洲联合基金项目(2020JJ6009); 大功率交流传动电力机车系统集成国家重点实验室开放课题

作者简介: 刘道正(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为高低压电器产品检测方法和设备。

金鑫(1977—), 男, 工程师, 研究方向为中低压配电网应用。

游坤奇(1991—), 男, 工程师, 研究方向为电器试验设备及试验方法。

0 引言

模块化多电平变换器(MMC)在2002年被提出,是一种极具吸引力的变换器拓扑结构^[1-2]。中高压直流输电具有不需要频率同步和相位同步的并网能力,在各种中高压直流输电变换器中,MMC由于具备高度的模块化特性和易扩展性,在中高压和大功率场合极具发展前景,对于中压驱动、柔性交流输电系统(FACTS)也极具有吸引力^[3-5]。

传统的MMC调制策略主要有正弦脉宽调制(SPWM)技术,以及最近电平逼近调制(NLM)^[6]。采用脉宽调制(PWM)策略需要对电容电压均衡控制,所需PI调节器数量多,增加了器件成本,并且其开关频率和三角载波频率成正比,随着载波频率增加,开关损耗增大,不适用于大功率应用场合^[7]。而采用NLM策略,通过对MMC子模块的脉冲触发算法进行优化,可以实现较低的开关频率输出,且具备输出波形谐波含量低等优点。对于变换器运行效率要求高的大功率应用场合,NLM技术更具优势。与传统的两电平变换器相比,MMC的主要特点是子模块(SM)的模块化结构、无需额外的直流电容器^[8-9]。但也正是由于MMC的SM数量多,每个SM中存在悬浮的电容器,会导致上下桥臂电容电压分布不均匀,在桥臂上产生环流,给变换器带来附加损耗^[10-12]。

综上所述,MMC主要需要解决的问题包括SM电容电压的均压控制以及环流抑制^[13-15]。另外,SM采用IGBT功率器件,由于SM的数量与直流侧电压成正比,基于MMC的这一特性,在高压直流输电中MMC的开关损耗对于总损耗来说是一个重要的研究问题。因此,为了使中高压直流输电系统高效运行,有必要对MMC的开关频率进行研究分析。针对上述问题,文献[16]介绍了传统的电容电压平衡控制方法,但是这种仅根据电容电压进行简单的升降压排序会导致SM的反复投切,产生较大的开关损耗;文献[17]提出一种基于双保持因子的排序法,但是SM的电容电压波动效果易受保持因子的影响。本文提出一种基于全桥型SM(FBSM)的改进均压方法,在能保

证SM电容电压均衡的前提下减少SM开关频率,有效降低MMC的开关损耗。

1 MMC拓扑结构和数学模型

MMC主拓扑结构如图1所示。基于级联的模块化单元组成,由 N 个SM组成上下桥臂,上下两桥臂构成相单元,这些SM采用IGBT功率器件,主要有半桥SM和全桥SM结构^[18],本文采用全桥型SM进行分析。图2为MMC单相等效电路图。设 j 相上桥臂电流为 i_{pj} ,下桥臂电流为 i_{nj} ,上桥臂SM电容电压之和为 u_{pj} ,下桥臂SM电容电压之和为 u_{nj} ,输出相电流为 i_j ,相间环流为 i_{cij} ,网侧的电动势为 e_j ,桥臂上的电感值为 L ,下标 $j=a, b, c$ 。

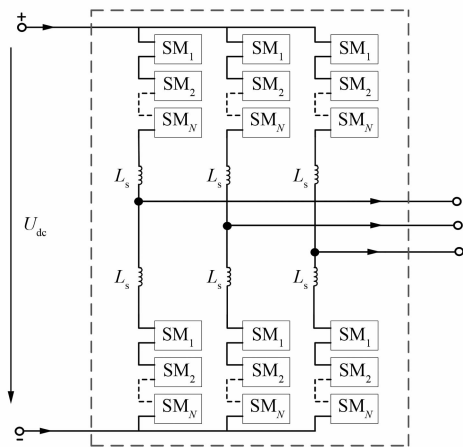


图1 MMC主拓扑结构

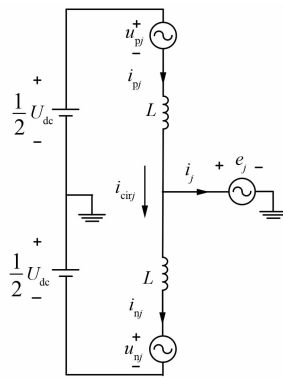


图2 MMC单相等效电路

根据KVL定律可得:

$$-\frac{u_{dc}}{2} + u_{pj} + L \frac{di_{pj}}{dt} + e_j = 0 \quad (1)$$

$$\frac{u_{dc}}{2} - u_{nj} - L \frac{di_{nj}}{dt} + e_j = 0 \quad (2)$$

将式(1)和式(2)相加后除以2,可得:

$$\frac{u_{pj} - u_{nj}}{2} + \frac{L}{2} \frac{d(i_{pj} - i_{nj})}{dt} + e_j = 0 \quad (3)$$

e_j 为第 j 相内部电动势,定义输出电压 u_j 、输出电流 i_j 以及相间环流 i_{diff} 分别为

$$i_j = i_{pj} - i_{nj} \quad (4)$$

$$u_j = \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} \quad (5)$$

$$i_{diff} = \frac{i_{pj} + i_{nj}}{2} \quad (6)$$

全桥 SM 结构如图 3 所示。根据 T1~T4 的导通状态,可以得到全桥 SM 的工作状态表如表 1 所示。

表 1 全桥 SM 的工作状态

工况	T1	T2	T3	T4	I_{SM}	U_{SM}	SM 状态
正常运行	1	0	0	1	-	U_c	正电平投入
	0	1	1	0	-	$-U_c$	负电平投入
	1	0	1	0	-	0	切出
	0	1	0	1	-	0	切出
故障	0	0	0	0	>0	U_c	闭锁
	0	0	0	0	<0	$-U_c$	闭锁

表 1 中,“1”表示 IGBT 开通,“0”表示 IGBT 关断。正常运行情况下,当 T1 开通时,T2 处于关断状态。当 T3 开通时,T4 处于关断状态。将 T1~T4 分为左右两部分,左边为 T1、T2,右边 T3、T4。为了实现全桥 SM 驱动,只需得到 T1 和 T3 的开关信号,再将 T2 和 T4 的开关信号分别对应取反即可。

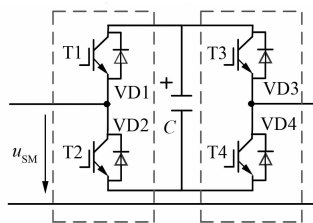


图 3 全桥 SM 结构

2 MMC 的调制方式

2.1 NLM 原理

MMC 的调制策略是控制开关器件通断的重

要方式,其中较为常用的调制方法是 NLM,NLM 采用阶梯波的方式,使输出电压波形随着电平数的增加逼近于正弦波,阶梯波幅值为 MMC 调制波的幅值。在任何开关周期,上、下桥臂同时投入的 SM 总数为 N ,上、下桥臂投入 SM 数 n_p 和 n_n 计算如下:

$$n_p = \frac{N}{2} - \text{round}\left(\frac{u_o^*}{U_c}\right) \quad (7)$$

$$n_n = \frac{N}{2} + \text{round}\left(\frac{u_o^*}{U_c}\right) \quad (8)$$

得到调制波电压与 SM 电容电压的比值,通过四舍五入函数得到上下桥臂需要投入的 SM 数目 N_{on} ,然后输入到电容电压平衡控制环节,分 2 步实现均压控制:(1)确定桥臂电流的极性来判断 SM 的充放电状态;(2)在每个采样周期内,对 SM 的电容电压值进行排序。NLM 控制原理框图如图 4 所示。

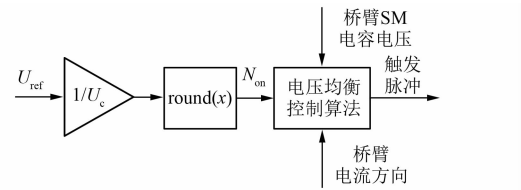


图 4 NLM 控制原理框图

利用调制波计算可以得到每时刻投入 SM 的数目:

$$N_{ref} = \text{round}\left(\text{abs}\left(\frac{u_{arm_ref}}{u_c}\right)\right) \quad (9)$$

式中:round(x)为取整函数;abs(x)为绝对值函数。

2.2 环流抑制

MMC 的各个相单元在直流侧并联连接,每个桥臂上的 SM 中存在悬浮存在的电容器,会导致电容电压的不均匀分布,导致每相的上下桥臂中除了负载电流外还存在环流成分。文献[19]指出桥臂环流成分主要为二倍频分量,包含交流分量和直流分量,其中交流分量会给桥臂电带来谐波污染,给系统带来额外的损耗和电流应力,因此是不可取的,必须对其进行抑制。而直流分量只用于和直流侧的功率交换,无需抑制。环流交流分量的存在会给变换器带来附加损耗,如果不对其进行抑制,甚至会影响系统的稳定运行。环流

的组成成分可以表示为

$$i_{cij} = i_{cij}^{dc} + i_{cij}^{ac} \tag{10}$$

式中： i_{cij}^{dc} 为直流分量； i_{cij}^{ac} 为交流分量。

比例谐振 (PR) 控制器的环流抑制方法,可以实现每相采用一组谐振控制器即可对特定次的环流谐波进行滤除,是一种零稳态误差控制,实现简单,环流抑制效果明显。PR 环流控制器框图如图 5 所示。

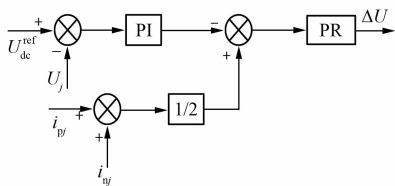


图 5 PR 环流控制器框图

图 5 中, U_{dc}^{ref} 直流参考电压, U_j 为桥臂 SM 的电压和, i_{pj} 、 i_{nj} 分别为上、下桥臂电流, ΔU 为环流抑制产生的电压偏差量。

2.3 改进均压控制方法

传统的排序法要求 SM 在每个开关时刻均需进行一次排序,从而造成 SM 在每个开关周期均需要进行投切状态的改变。本文所提改进均压排序法如图 6 所示。以单相上桥臂为例,分别采集全桥 SM 左右两桥臂在上一个开关周期下的开关状态 S_i ,对于处于投入状态的 SM,当桥臂电流 $i_{pj}>0$ 时,给该 SM 左(右)桥臂电容电压值 $u_{sm,i}$ 减

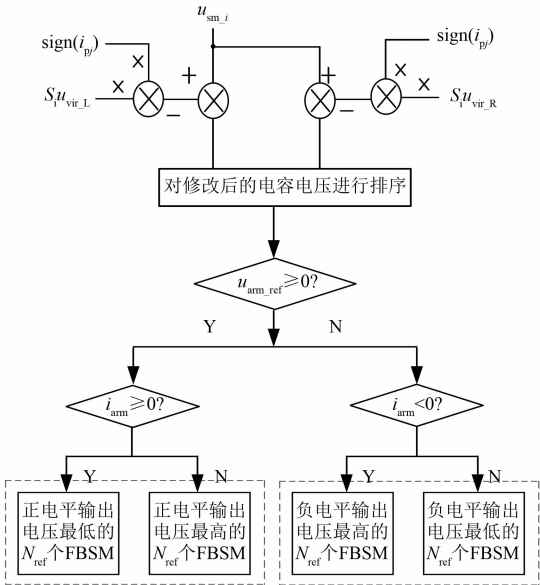


图 6 改进电容电压排序全桥 SM 控制流程图

去一个电压偏差量 $u_{vir,L}(u_{vir,R})$;当桥臂电流 $i_{pj}<0$ 时,则给该 SM 左(右)桥臂电容电压值 $u_{sm,i}$ 加上一个电压偏差量 $u_{vir,L}(u_{vir,R})$;对于处于切除状态的 SM,维持当前电压值不变。最后对调整后的 SM 电容电压值进行升压或者降压排序,需注意的是此时不再是对实际的电容电压进行升降压排序。通过以上操作,在可调电压偏差量的范围内,可以让 SM 具备了保持上一个开关状态的能力,减少了 SM 没必要的反复投切,从而实现减少 IGBT 的开关频率。

3 仿真分析

为了验证所提均压方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 平台搭建了 20 电平的仿真模型,仿真参数如表 2 所示。

表 2 MMC 仿真参数

参数名称	参数值
直流母线/V	20 000
桥臂 SM 个数	19
额定电容电压/V	1 050
桥臂电感值/mH	10
SM 电容容值/ μ F	4 000
额定频率/Hz	50
额定电流幅值/A	500
负载电阻/ Ω	21

在 20 电平的仿真中,分别对传统均压排序和改进均压排序 2 种方法进行了比较分析,不同阀控周期下 2 种方法的开关频率情况如图 7 所示。由图 7 可知,2 种电压排序法的开关频率均随阀控周期的增大而降低,符合频率和周期的反比关系。但是传统排序法的开关频率受阀控周期影响较大,且开关频率始终较高。相反,改进均压控制方法在阀控周期不同的情况其开关频率始终保持在一个较低的开关水平,开关频率明显降低,说明该方法可以相对稳定的保证 MMC 可以获得较低

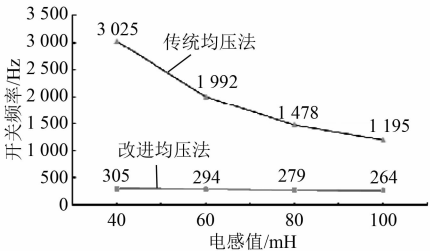


图 7 2 种方法不同阀控周期下开关频率关系

的开关损耗。图 8 所示为采用传统均压方法和改进均压算法时上桥臂第一个全桥 SM 的开关脉冲信号。由图 8 可以看出,基于改进均压算法时 SM 的开关频率显著降低。

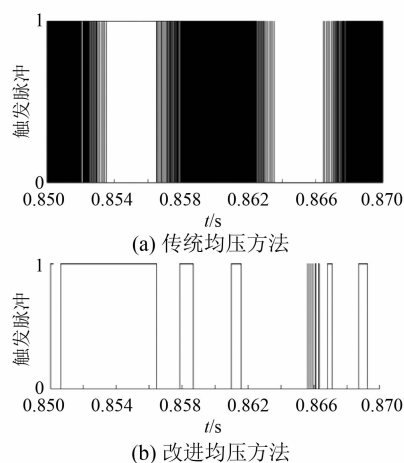


图 8 上桥臂第一个 SM 触发脉冲

图 9 所示为环流抑制效果对比波形。在 0.5 s 时投入 PR 环流控制器,可以看出,投入 PR 环流控制器后桥臂中的环流得到有效抑制。图 10 所示为改进均压法 SM 电容电压均压效果图。采用改进均压方法时电容电压波动能得到有效控制,波动范围保持在允许的 10% 以内,在 0.5 s 投入 PR 环流控制器后,电容电压波动范围进一步得到缩小。

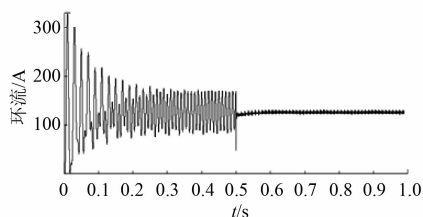


图 9 环流抑制效果对比

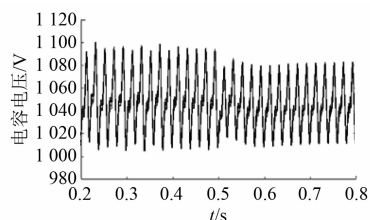


图 10 改进均压法电容电压均压效果对比

图 11 所示为采用传统均压方法和改进均压方法时的输出相电流波形和相应的频谱分析对比

图。输出相电压为 20 电平。由图 11(a)可知,传统方法下输出相电流的总谐波畸变率(THD)为 2.34%;由图 11(b)可知,改进均压方法下的 THD 为 2.29%,说明使用改进均压方法不会对 MMC 系统的外部输出特性产生负面影响。

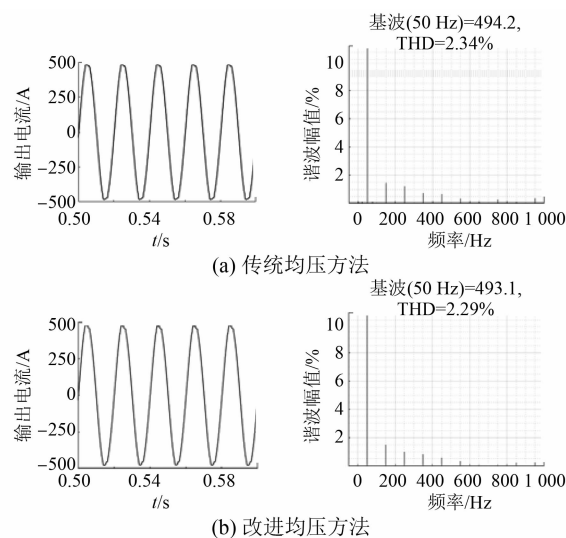


图 11 输出相电流和和频谱分析对比图

4 结 语

本文通过对传统均压排序法的研究分析,提出一种基于全桥 SM 的改进均压方法,基于改进电容电压排序,让处于投切状态的电容器具备维持上一个电平状态的能力,避免了电容器反复投切,从而降低了 IGBT 的开关次数。为了验证所提方法的有效性,利用 MATLAB/Simulink 平台搭建了直流电压 20 000 V,输出 20 电平的仿真模型。仿真结果表明,所提方法在保证 SM 电容器的电压波动在允许范围的前提下,有效减少了 IGBT 的开关频率,从而实现 MMC 的低损耗运行,同时不会对 MMC 系统的外部输出交流特性产生负面影响。

【参考文献】

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C] //2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003.
- [2] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission [C] //2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008.

- [3] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760.
- [4] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的方波脉冲循环调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 42.
- [5] 魏晨华, 杨岩, 谢阳, 等. 模块化多电平变换器关键问题研究综述[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 182.
- [6] 何梨梨, 帅智康, 单佳佳. MMC 的多载波调制策略对比分析[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 56.
- [7] 李彬彬, 周少泽, 徐殿国. 模块化多电平变换器与级联 H 桥变换器在中高压变频器应用中的对比研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 9.
- [8] 徐殿国, 李彬彬, 周少泽. 模块化多电平高压变频技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 104.
- [9] SHE X, HUANG A Q. Circulating current control of double-star chopper-cell modular multilevel converter for HVDC system [C] // IECON 2012—38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012.
- [10] 陈耀军, 陈柏超, 钟炎平, 等. 模块化多电平变换器全电平产生原理及电容均压策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 126.
- [11] 许建中, 李钰, 陆锋, 等. 降低 MMC 子模块电容电压纹波幅值的方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 571.
- [12] 冯志国, 葛曼玲, 陈玉民. 模块化多电平换流器的环流抑制方法研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 48.
- [13] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15.
- [14] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547.
- [15] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2903.
- [16] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53.
- [17] 陆翌, 王朝亮, 彭茂兰, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 52.
- [18] 石绍磊, 李彬彬, 张毅, 等. 模块化多电平型高压 DC/DC 变换器的研究[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 110.
- [19] TU Q, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009.

(上接第 74 页)

- [12] HEMA V K, DHANALAKSHMI R. Power sharing of an autonomous hybrid microgrid with an interlinking converter [C] // IET Chennai Fourth International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2013), 2013.
- [13] 高泽, 杨建华, 季宇, 等. 交直流混合微电网接口变换器双向下垂控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 82.
- [14] XIAO H, LUO A, SHUAI Z, et al. An improved control method for multiple bidirectional power converters in hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 340.
- [15] 张学军, 许博, 张一非, 等. 基于小交流信号注入的接口变换器二次控制方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(18): 141.
- [16] QI G, CHEN A, CHEN J. Improved control strategy of interlinking converters with synchronous generator characteristic in islanded hybrid AC/DC microgrid [J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2017, 2(2): 149.
- [17] PEYGHAMI S, MOKHTARI H, LOH P C, et al. Distributed primary and secondary power sharing in a droop-controlled LVDC microgrid with merged AC and DC characteristics [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2284.
- [18] PEYGHAMI S, DAVARI P, MOKHTARI H, et al. Synchronverter-enabled DC power sharing approach for LVDC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8089.
- [19] PEYGHAMI S, MOKHTARI H, BLAABJERG F, et al. Decentralized load sharing in a low-voltage direct current microgrid with an adaptive droop approach based on a superimposed frequency [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(3): 1205.