

柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制研究

王世君,郝泉,李文龙

(国网冀北电力有限公司承德供电公司,河北 承德 067000)

摘要:针对现有方法对柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制时存在运行波形不稳定、输出电流应力高和负载瞬时波动差等问题,提出了基于三维调制的柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制方法。利用三维调制法对变换器中电容电压进行调节,平衡DC-DC变换器中电容电压;通过双移相(DPS)法分析变换器电流应力特性,计算外移相角获取变换器的电流占空比;最后通过获取变换器的电流占空比,完成了柔性变电站双向DC-DC变换器的自主均流控制。实验结果表明:所提方法可提升双向DC-DC变换器的电流运行波形稳定性,降低电流应力,改善负载瞬时波动。

关键词:三维调制;柔性变电站;自主均流控制;变换器;输出电流

中图分类号:TM93 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed23417

Research on Autonomous Current Sharing Control of Bidirectional DC-DC Converter in Flexible Substation

WANG Shijun, HAO Quan, LI Wenlong

(State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Chengde Power Supply Company,
Chengde 067000, Hebei, China)

Abstract: In view of the problems of unstable operation waveforms, high output current stress and instantaneous fluctuation difference of load in the current sharing control of two-way DC-DC converter in flexible substation, a method of independent current sharing control of two-way DC-DC converter in flexible substation based on three-dimensional modulation was proposed. Three dimensional modulation method was used to adjust the capacitor voltage in DC-DC converter to balance the capacitor voltage in DC-DC converter. Dual phase shift (DPS) method was used to analyze the current stress characteristics of the converter and calculate the phase shift angle to obtain the current duty cycle of the converter. Finally, by acquiring the current duty cycle of the converter, the independent current sharing control of the two-way DC-DC converter in flexible substation was completed. The experimental results show that the proposed method can improve the current waveform stability of bidirectional DC-DC converter, reduce the current stress and improve the load transient fluctuation.

Key words: three-dimensional modulation; flexible substation; autonomous current sharing control; converter; output current

近年来,随着科技的不断发展,电子设备的使用量不断增多^[1],对电源系统供电质量要求越来越高。为了提供更高质量的电源,采用多个电源块并联式供电模式,在该模式中变换器必须保持均流运行,以保证正常的供电需求,但在此过程中,由于多种因素影响导致其无法均流运行^[2-3],严重影响供电质量的提升。因此,如何提升变换器均流控制成为该领域研究的热点问题。

文献[4]提出基于自适应虚拟阻抗的柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制方法。该方法首先基于变换器原理,对变换器系统环流特性进行分析,再利用自适应的虚拟环流阻抗对分析结果进行抑制,最后通过自适应虚拟阻抗匹配法计算变换器的抑制结果,实现自主均流控制。该方法由于未能通过计算获取变换器的直流侧电压与交流侧电压之间关系,导致变换器内开关

基金项目:国家电网公司科技项目(SGNX0000DKJS1900460)

通讯作者:王世君(1972—),男,本科,高级工程师,Email:wwxj2018@163.com

周期直流侧电压不稳定,存在一定局限性。文献[5]提出基于滑动平均的DC-DC变换器自主均流控制方法。该方法首先采用滑动平均滤波法对DC-DC变换器中电感电流进行滤波处理,再对滤波后的电流值进行PID计算,以此确定调节变换器的开关管占空比,完成变换器的自主均流控制。该方法由于未能在变换器进行自主均流控制前对双向DC-DC变换器内检测到的电压进行正弦调制,获取电压占空比误差较大,导致负载能力差。

为解决上述存在的问题,本文提出基于三维调制的柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制方法。与传统方法相比,所提方法可有效改善柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制效果,具有一定可行性。

1 变换器内电容电压的平衡

为提升变换器自主均流控制效果,利用三维调制方法对DC-DC变换器内电容、电压进行调制,使DC-DC变换器内的电容电压能够平衡^[6]。

首先对柔性变电站双向DC-DC变换器内的电压进行检测,再将检测到的直流侧电压以及交流侧电压进行正弦调制,计算DC-DC变换器中各桥占空比,最后调节变换器内各桥之间的有功功率,从而使各路电压趋于平衡。

1.1 三维调制方法

将DC-DC变换器中整流器交流侧电压表示为

$$v_{con} = v_1 + v_2 + v_3 \quad (1)$$

式中: v_1, v_2, v_3 均为变换器中两方交流侧电压; v_{con} 为整流器交流侧电压总值。

其中,在 $[-v_{dc1}, v_{dc1}]$ 范围内任意值均可作为变换器中两方交流侧电压 v_1, v_2 以及 v_3 的平均值。

设 v_{con} 在 v_1 的开关周期内平均值为 V_{con1} , V_{con1} 的取值范围为 $[-(v_{dc1} + v_{dc2} + v_{dc3}), (v_{dc1} + v_{dc2} + v_{dc3})]$ 。将DC-DC变换器内的交流侧电压 v_1, v_2 以及 v_3 放入一个三维空间内,并将其作为三维空间中的 x, y, z 轴,如图1所示。

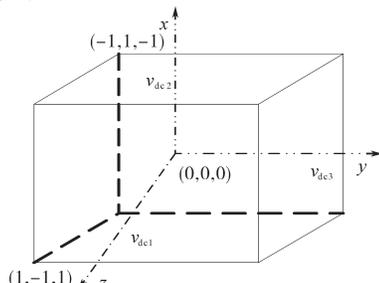


图1 变换器的三维调制空间

Fig.1 Three-dimensional modulation space of the converter

由图1可知,三维空间坐标点 $(-1, 1, -1)$, $(1, -1, 1)$, $(0, 0, 0)$ 内的 $(-1, 0, 1)$,其为双向DC-DC变换器中各桥占空比取值 (D_3, D_2, D_1) 。设定此区域为双向DC-DC变换器的三维调制区,超出该区域的值无效且不能合成三桥,由于双向DC-DC变换器在运行时无法确定直流侧电压的高低,因此将变换器内直流侧电压最低的桥作为 z 轴,当 $v_{dc1} < v_{dc2} < v_{dc3}$ 时,各桥为 $1 = z, 2 = x, 3 = y$;当 $v_{dc1} > v_{dc2} > v_{dc3}$ 时,各桥为 $1 = y, 2 = x, 3 = z$ 。设定三维调制是在 $v_{dc1} < v_{dc2} < v_{dc3}$ 情况下进行,所以DC-DC变换器的三桥负载 $R_1 < R_2 < R_3$ 。

由于双向DC-DC变换器的开关频率较高,在整个桥开关周期内直流侧电压可维持稳定,双向DC-DC变换器的直流侧与交流侧的电压关系为

$$\begin{cases} V_1 = D_1 v_{dc1} \\ V_2 = D_2 v_{dc2} \\ V_3 = D_3 v_{dc3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: V_1, V_2, V_3 分别为双向DC-DC变换器的直流侧与交流侧的不同电压值。

此时,由式(1)可知双向DC-DC变换器中 V_{con} 的值如下式:

$$V_{con} = V_1 + V_2 + V_3 = D_1 v_{dc1} + D_2 v_{dc2} + D_3 v_{dc3} \quad (3)$$

由上述计算结果可知,三维调制空间内 x, y, z 轴垂直于 α 平面内所有调制点,且 $\alpha = x + y + z = V_{con}$ 。 α 平面能够与 V_{con} 的取值对应,在双向DC-DC变换器的工频周期内, V_{con} 按正弦规律变化, α 平面上的 $(1, 1, 1)$ 与 $(-1, -1, -1)$ 之间也跟随正弦规律进行周期循环。作为 α 平面内的 α 曲线,可直接将双向DC-DC变换器内开关周期与三维调制点进行连接^[7]。

DC-DC变换器内交流电源频率远低于整流桥的开关频率,开关周期内的调制波 V_{comm} 保持稳定不变,而 V_{con} 值为

$$V_{con} = V_{comm} \quad (4)$$

此时,选择 α 平面上任意三维调制点合成 v_{con} ,选取调制点在 $x, y, z = 0$ 平面的投影 V_3, V_2, V_1 中值,再利用式(2)计算DC-DC变换器中三桥占空比。

DC-DC变换器中各桥开关周期的有功功率为

$$\begin{cases} P_1 = V_1 i_s = D_1 v_{dc1} i_s \\ P_2 = V_2 i_s = D_2 v_{dc2} i_s \\ P_3 = V_3 i_s = D_3 v_{dc3} i_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_s 为额定电流值。

同一个 α 平面不同调制点合成的 V_{con} 相同。由于 V_3, V_2, V_1 的取值不同,双向DC-DC变换器中

三桥有功能量也不尽相同,通过三维调制点调节双向DC-DC变换器中各桥之间的有功功率,从而使直流侧电压电容得到平衡^[8]。

1.2 调节轨迹选取

当DC-DC变换器中三桥的直流侧电压相同时,要同时使三桥占空比达到一致,以此保持三桥的直流侧电压的平衡,利用曲线 $z = x = y$ 计算DC-DC变换器中的三桥占空比,即

$$\begin{cases} D_1 = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc1} = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc}^* \\ D_2 = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc2} = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc}^* \\ D_3 = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc3} = \frac{1}{3} V_{con} / v_{dc}^* \end{cases} \quad (6)$$

式中: v_{dc}^* 为 $[-v_{dc1}, v_{dc1}]$ 范围内任意电压值。

若双向DC-DC变换器中三桥的负载 $R_1 < R_2 < R_3$, 将双向DC-DC变换器开关周期内三桥的有功能量进行调节,以此维持直流侧电容电压的平衡。在三维调制空间中,若调制点发生位移,那么双向DC-DC变换器占空比 ΔD_1 增量会随之加大,获取的有功能量也增多,所以桥1的增量会保持在最大状态。三维调制的轨迹则如图2所示。双向DC-DC变换器中三桥调制波形如图3所示。

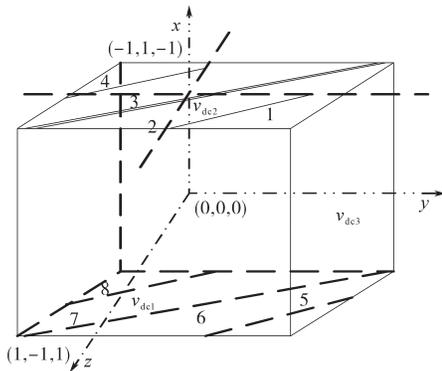


图2 三维调制轨迹曲线图

Fig.2 Three dimensional modulation trajectory curve

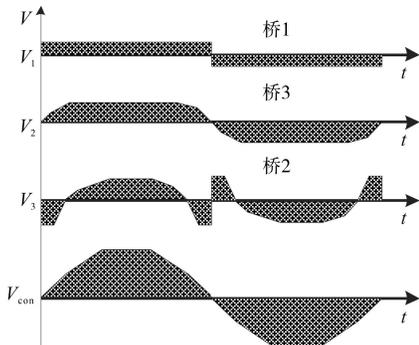


图3 各桥中调制波形图

Fig.3 Modulation waveforms in each bridge

2 自主均流控制实现

利用DPS法实现柔性变电站双向DC-DC变换器的自主均流控制。其控制原理如图4所示。

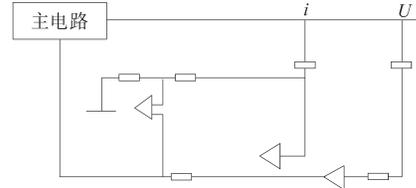


图4 自主均流控制原理

Fig.4 Principle of independent mean flow control

从图4可以看出,通过设置的并联模块,将其中电流较大的部分作为主要部分,通过均流的主电路中的电压展示了最大的电流,正常运行情况下其均流较为均衡,但运行过程中每个模块由于多因素影响导致出现异常,因此,通过对这些异常行为进行三维调制,完成其自主均流控制。

2.1 电流应力特性分析

双向DC-DC变换器的传输功率表示为

$$P = \frac{nV_1V_2}{8f_s l} \times (4D_2 + 4D_2^2 - 2D_1^2) \quad (7)$$

式中: n 为变换器传输次数; f_s 为电压放大倍数; l 为传输的距离。

对于DC-DC变换器在均流控制时,不仅要变换器中各结构部分进行控制,还要调节变换器输出时电流以及输入时电压的平衡^[9]。依据上述计算结果可知,传输功率在输入与输出端的功率相等。若设定DC-DC变换器中每一结构模块的变换效率为1,依据功率守恒可计算出输出电压及输入电压,即

$$\begin{cases} V_{outm} = V_{inm} A_{in} \\ V_{in1} = V_{in2} = \dots = V_{inm} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_{inm} 为双向DC-DC变换器的输入电压; A_{in} 为输入电压抗干扰因子。

DC-DC变换器中结构模块的输入与输出电压一致,所以为保证柔性变电站双向DC-DC变换器能够正常运行,要保证变换器中各个结构模块的输出电流进行均流控制。

计算DC-DC变换器的第 i 个结构模块的传输功率,过程如下式所示:

$$P_i = \frac{n_i V_{inm} V}{2L_i f_s} [D_{2i}(1 - D_{2i}) - \frac{1}{2} D_{1i}^2] \quad (9)$$

再依据传输功率结果,获取DC-DC变换器的输出电流结果,即

$$I_{oi} = \frac{n_i V_{inm}}{2L_i f_s} [D_{2i}(1 - D_{2i}) - \frac{1}{2} D_1^2] \quad (10)$$

根据式(10)计算,获取DC-DC变换器的双向电流输出为

$$\begin{cases} I_{o1} = \frac{n_1 V_{inm}}{2L_1 f_s} [D_{21}(1 - D_{21}) - \frac{1}{2} D_1^2] \\ I_{o2} = \frac{n_2 V_{inm}}{2L_2 f_s} [D_{22}(1 - D_{22}) - \frac{1}{2} D_1^2] \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_i 为各向变换器的电力感应值; D_{2i} 为双向DC-DC变换器的各向外移相角。

2.2 外移相角计算

若要在双向DC-DC变换器参数不匹配情况下实现均流控制,需要对变换器的外移相角值进行调节并结合式(10)进行计算,得到:

$$\frac{n_1}{L_1} (1 - D_1 - \frac{1}{2} D_1^2) = \frac{n_2}{L_2} [(D_1 + \Delta D)(1 - D_1 - \Delta D) - \frac{1}{2} D_1^2] \quad (12)$$

同时,将 $N_1 = n_1/L_1, N_2 = n_2/L_2$ 作为双向DC-DC变换器的各向内参数,结合式(11)获取变换器的外移相角,即占空比:

$$D_2 = D_1 + (\frac{N_1 - N_2}{N_2}) \frac{D_1 + D_1^2 - \frac{1}{2} D_1^2}{1 - 2D_1} \quad (13)$$

然后 ΔD 和 I_{oi} 对 D_1 进行求导,当 $N_1 > N_2, 0 < D_1 < 0.5, 0 < D_2 < 0.5$ 时,可获取下式:

$$\begin{cases} d(\Delta D)/d(D_1) > 0 \\ d(I_{oi})/d(D_1) > 0 \end{cases} \quad (14)$$

依据上述计算结果可知,在 D_1 增加过程中, ΔD 与 I_{oi} 随之增加,柔性变电站的DC-DC变换器输出电流也随之增加,从而使变电站的电压环做出相应调节形成负反馈^[10]。

2.3 均流控制

在上述获取的双向DC-DC变换器外移相角确定基础上,对变换器的脉宽进行调制^[11]。设定双向DC-DC变换器内部位移占空比为 ΔD_1 ,双向DC-DC变换器外移相角 $D_N = D_1 = D_2$,双向DC-DC变换器的输出电流为

$$\begin{cases} I_{o1} = \frac{n_1 V_{inm}}{2L_1 f_s} [D_1(1 - D_1) - \frac{1}{2} \Delta D_1^2] \\ I_{o2} = \frac{n_2 V_{inm}}{2L_2 f_s} [D_2(1 - D_2) - \frac{1}{2} \Delta D_1^2] \end{cases} \quad (15)$$

当变换器参数不匹配时,需对双向DC-DC变换器占空比进行调节,从而实现变换器输出均流电流,设变换器的输出电流总扰动为

$$\begin{cases} I_{o1} = \frac{n_1 V_{inm}}{2L_1 f_s} [(D_N - \Delta D_1)(1 - D_N + \Delta D_1) - \frac{1}{2} Z_1^2] \\ I_{o2} = \frac{n_2 V_{inm}}{2L_2 f_s} [(D_N - \Delta D_2)(1 - D_N + \Delta D_2) - \frac{1}{2} Z_1^2] \end{cases} \quad (16)$$

式中: Z_1 为电流扰动量。

为实现柔性变电站双向DC-DC变换器的均流控制,需要将输出电流的变化总值设定为0,参数的比值计为

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{-\Delta D_2^2 \pm \Delta D_{22} - 2(\Delta D_2)\Delta D_1}{\Delta D_1^2 \pm \Delta D_{21} - 2(\Delta D_1)\Delta D_1} \quad (17)$$

通过计算双向DC-DC变换器内参数比值,结合上述获取的变换器的占空比,得到:

$$\begin{cases} D_2 = D_1 + (\frac{N_1}{N_2} - 1) \frac{D_1 - D_1^2 - \frac{1}{2} Z_1^2}{1 - 2Z_1} & N_1 > N_2 \\ D_2 = D_1 - (\frac{N_1 - N_2}{N_2}) \frac{D_1 - D_1^2 - \frac{1}{2} Z_1^2}{1 - 2D_1} & N_1 < N_2 \end{cases} \quad (18)$$

通过获取的变换器占空比完成柔性变电站双向DC-DC变换器的自主均流控制。

3 实验分析

3.1 实验环境

为验证所提方法的整体有效性,搭建了STM32F207实验平台进行实验分析,其中输入电压为600V,最大输出电压为500V,功率为4kW,工作频率为20kHz。实验用双向DC-DC变换器如图5所示。



图5 实验用双向DC-DC变换器

Fig.5 Bidirectional DC-DC converter for experimental use

3.2 实验参数

实验参数如下:共用负载10Ω,输出电阻0.1~0.4Ω,电压调节器参数0.02~0.06,惯性延迟0.1,电流100~300A。

3.3 实验方案

分别采用基于三维调制的柔性变电站双向DC-DC变换器自主均流控制研究(方法1)、基于

自适应虚拟阻抗的柔性变电站DC-DC变换器自主均流控制方法(方法2)以及基于滑动平均的柔性变电站DC-DC变换器自主均流控制方法(方法3)进行测试,以电流运行波形、变换器输出电流应力以及瞬时减载为测试指标,验证所提方法的有效性。

3.4 实验结果分析

在上述实验环境下,对方法1、方法2以及方法3的双向DC-DC变换器运行波形进行测试,测试结果如图6所示。

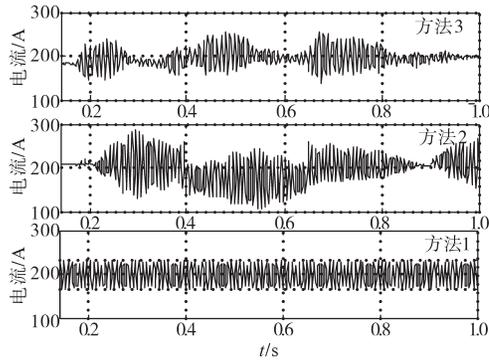


图6 不同方法电流运行波形变化分析

Fig.6 Analysis of current operation waveforms change in different methods

依据图6可知,随着双向DC-DC变换器运行时长的不断变化,三种方法电流运行的波形存在一定变化。其中,方法1运行波形要比方法2及方法3稳定均衡,并且在电流应力上具有明显优势,这主要是由于方法1在进行自主均流控制前,利用三维调制法将DC-DC变换器中的电容电压进行调制使其达到平衡,从而保证了变换器自主均流控制时运行波形的稳定。

实验中,利用方法1、方法2以及方法3对双向DC-DC变换器的输出电流应力进行测试,测试结果如图7所示。

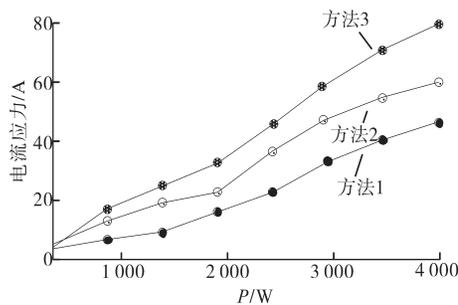


图7 不同方法输出电流应力测试结果

Fig.7 Output current stress test results of different methods

依据图7可知,随着功率的不断变化,采用三种方法输出的电流应力测试结果存在一定差距。其中,采用方法1双向DC-DC变换器输出电流应

力要低于其余两种方法。方法1能够将电流应力维持在最佳水平,并能够随着双向DC-DC变换器功率的增大随之发生改变。这是由于方法1通过计算获取了双向DC-DC变换器的直流侧电压与交流侧电压之间的关系,从而维持了变换器内的开关周期直流侧电压的稳定,以此降低双向DC-DC变换器的电流应力,平衡输出的电流。

根据上述测试结果,对方法1、方法2以及方法3的负载瞬时波动进行测试,测试结果如图8、图9所示。

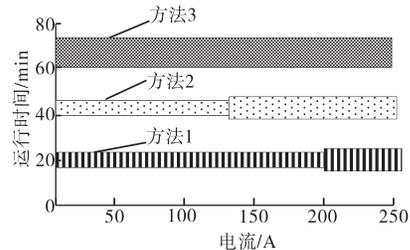


图8 瞬时加载测试结果

Fig.8 Instantaneous loading test results

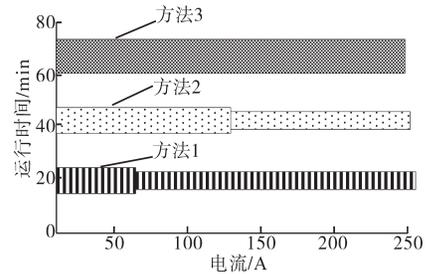


图9 瞬时减载测试结果

Fig.9 Instantaneous load shedding test results

依据图8、图9可知,方法1在双向DC-DC变换器负载突加或突减时,能够使变换器的瞬时波动快速进入稳定状态,而方法2以及方法3的稳定时间相对较长。这主要是因为方法1在进行自主均流控制前首先对双向DC-DC变换器内的电压进行检测,再将检测到的直流侧电压以及交流侧电压进行正弦调制,获取电压占空比,从而使变电站双向DC-DC变换器能够实现良好的均流控制,提高了DC-DC变换器的负载能力。

4 结论

针对传统变换器自主均流控制方法中存在的不足,提出一种新的DC-DC变换器自主均流方法。通过三维调制法对变换器中电容电压进行调制,以此平衡变换器中的电容电压,再利用DPS法来实现柔性变电站DC-DC变换器的自主均流控制。实验结果表明:所提方法可有效提升DC-DC变换器自主均流控制效果。

参考文献

- [1] 王创,景妍妍. 基于自抗扰控制的双向DC-DC变换器并联均流控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(5):97-102,113.
Wang Chuang, Jing Yanyan. Parallel current sharing control of Bidirectional DC-DC converter based on active disturbance rejection control[J]. Motor and Control Applications, 2020, 47(5):97-102, 113.
- [2] 孙伟男,戴云聪. 一种交错并联DC-DC变换器数字优化控制方法[J]. 电气传动,2018,48(1):32-35.
Sun Weinan, Dai Yuncong. A digital optimal control method for interleaved DC-DC converters[J]. Electric Drive, 2018, 48(1): 32-35.
- [3] 傅守强,高杨,陈翔宇,等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术研究与工程实践[J]. 电力建设,2018,39(5):51-60.
Fu Shouqiang, Gao Yang, Chen Xiangyu, *et al.* Technical research and engineering practice of AC/DC distribution network based on flexible substation[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5):51-60.
- [4] 钱学伟,姜波,程志江. 基于自适应虚拟阻抗的DC-DC变换器均流控制[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2016,40(4):67-72.
Qian Xuewei, Jiang Bo, Cheng Zhijiang. Current sharing control of DC-DC converter based on adaptive virtual impedance[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2016, 40(4):67-72.
- [5] 张笑笑,储昭碧,董学平. 基于滑动平均的并联Buck变换器均流控制[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(10):177-182.
Zhang Xiaoxiao, Chu Zhaobi, Dong Xueping. Current sharing control of parallel Buck converter based on moving average[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(10):177-182.
- [6] 王建元,武金亚,温伟伟,等. 基于DC-DC变换的变电站直流电源设计[J]. 电测与仪表,2018,55(24):146-150.
Wang Jianyuan, Wu Jinya, Wen Weiwei, *et al.* Design of substation DC power supply based on DC-DC conversion[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(24):146-150.
- [7] 邹儒泉,何睿,高文根. 滑模控制在三相交错并联双向DC-DC变换器中的应用[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2020,36(1):1-5.
Zou Ruquan, He Rui, Gao Wengen. Application of sliding mode control in three-phase interleaved bidirectional DC-DC converter[J]. Journal of Qiqihar University (Natural Science Edition), 2020, 36(1):1-5.
- [8] 张建华,李欧. 基于双向DC/DC智能母联的直流电源系统的研究[J]. 通信电源技术,2019,36(8):30-31.
Zhang Jianhua, Li Ou. Research on DC power supply system based on bidirectional DC/DC intelligent bus tie[J]. Communication Power Supply Technology, 2019, 36(8):30-31.
- [9] 何丽,王晓东,张恒辉. 基于L6615D的DC/DC变换器并联均流电路设计[J]. 电子技术与软件工程,2020,175(5):225-229.
He Li, Wang Xiaodong, Zhang Henghui. Design of parallel current sharing circuit for DC/DC converter based on l6615D[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2020, 175(5): 225-229.
- [10] 姚为正,辛德锋,甘江华,等. 适用于ISOP拓扑的DC/DC变换器研究[J]. 高压电器,2020,56(1):110-119.
Yao Weizheng, Xin Defeng, Gan Jianghua, *et al.* Research on DC/DC converter for ISOP topology[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1):110-119.
- [11] 胡庆东,郭家虎. 新能源直流并网逆变器双环控制算法仿真[J]. 计算机仿真,2020,37(10):78-82.
Hu Qingdong, Guo Jiahu. Simulation of double loop control algorithm for new energy DC grid connected inverter[J]. Computer Simulation, 2020, 37(10):78-82.

收稿日期:2021-04-26

修改稿日期:2021-05-27