

# 基于交流小信号注入的双向DC-DC变换器 均流控制

段慧芹<sup>1</sup>, 黄志勇<sup>1</sup>, 杜书平<sup>1</sup>, 鄢天毕<sup>2</sup>, 韦永恒<sup>2</sup>, 魏红星<sup>2</sup>, 程卓<sup>2</sup>

(1. 国网信阳供电公司, 河南 信阳 464000;

2. 贵阳锐泰电力科技有限公司, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 储能双向DC-DC变换器作为实现直流微电网功率平衡的关键设备, 变换器间的功率分配是多变换器并联控制的主要目标之一。为了解决双向DC-DC变换器的均流问题, 提出了一种基于交流电压小信号注入的并联均流控制策略。设计了双向DC-DC变换器的充/放电切换策略, 并在双向DC-DC变换器的高压侧的电压中注入交流电压小信号, 利用交流电压产生的无功功率协调各变换器的电流, 进而实现了双向DC-DC变换器在充放电多工况下的负载精确分配。最后, 实验验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词:** 双向DC-DC变换器; 均流控制; 频率下垂;  $Q-V$ 下垂控制

**中图分类号:** TM46 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22961

## Current Sharing Control of Bidirectional DC-DC Converter Based on AC Voltage Small Signal Injection

DUAN Huiqin<sup>1</sup>, HUANG Zhiyong<sup>1</sup>, DU Shuping<sup>1</sup>, YAN Tianbi<sup>2</sup>, WEI Yongheng<sup>2</sup>, WEI Hongxing<sup>2</sup>, CHENG Zhuo<sup>2</sup>

(1. State Grid Xinyang Power Supply Company, Xinyang 464000, Henan, China; 2. Guiyang Ruitai

Electric Power Technology Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China)

**Abstract:** Bidirectional DC-DC converter is the key equipment to realize the power balance of DC microgrid, and the accurate distribution of load current is one of the main objectives of multi converter parallel control. Aiming at the current sharing problem of bidirectional DC-DC converter, a current sharing control based on AC voltage small signal injection was proposed. The charging and discharging switching strategy of bidirectional DC-DC converter was designed, and a small AC voltage signal was injected into the voltage of high voltage side of bidirectional DC-DC converter, and the reactive power generated by AC voltage was used to coordinate the current of each converter, so as to realize the accurate load distribution of bidirectional DC-DC converter under multiple charging and discharging conditions. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method were verified by experiments.

**Key words:** bidirectional DC-DC converter; current sharing control; frequency droop;  $Q-V$  droop control

随着清洁能源的发展, 直流微电网已成为解决光伏和风电等分布式能源供电稳定的关键技术之一<sup>[1-2]</sup>。在直流微电网内协调控制不同类型分布式发电单元、储能单元、交直流负荷等装置, 实现系统高效和可靠运行, 是直流微电网稳定控制的研究重点<sup>[3-5]</sup>。

直流微电网中变换器因其作用不同控制方法也不同, 主要有: 直流母线电压控制、最大功率点跟踪、下垂控制以及恒流充放电控制等。下垂

控制因其可靠性和灵活性, 是直流微电网设备级控制中最基本的控制策略<sup>[6-8]</sup>。下垂控制是利用变换器的输出电流作为反馈信号来增加变换器的等效输出阻抗, 实现并联变换器间的均流控制。采用下垂控制的直流微电网系统具有更高的可靠性和即插即用性能, 更加便于系统的扩容<sup>[9-10]</sup>。在下垂控制中, 引入的虚拟阻抗越大, 变换器内阻及线路阻抗对功率均分的影响越小, 但同时母线电压偏差会越大, 因此下垂控制中母线

**基金项目:** 国网河南省电力公司科技项目(5217701500FZ)

**作者简介:** 段慧芹(1978—), 女, 硕士, 高级工程师, Email: 934267351@qq.com

电压调节和电流分配精度之间存在矛盾<sup>[11-12]</sup>。

二次控制旨在减小母线电压偏差和提高电流分配精度。二次集中控制器根据母线电压偏差统一协调各变换器电压,平移下垂曲线或改变下垂系数,来提高直流母线电压精度和均流精度<sup>[6-7,13-14]</sup>。集中控制最大缺陷是可靠性过度依赖母线电压传感器和二次集中控制器。分布式二次控制利用通信获取其他变换器的电压和电流信息,由本地的控制器进行二次调节,可以避免集中式二次控制中存在的单点故障问题<sup>[15-17]</sup>。分布式控制过于依赖通信共享电压和电流信息。文献[18]中利用电力线(power-line signaling, PLS)传输频率信号并实现多个变换器的协调,但高频抗干扰能力较差。

为解决直流微电网中双向DC-DC变换器的均流问题,本文提出一种基于低频交流电压小信号注入的均流控制。分析了双向DC-DC变换器的充放电控制,设计了充/放电切换策略。在变换器输出电压中注入了固定幅值的交流电压小信号,注入信号的频率与输出电流大小成比例,分析了该方法对变换器闭环带宽的要求。利用注入交流电压产生的无功功率协调各变换器输出电流大小,分析了无功补偿实现均流的原理。最后,实验验证了所提方法的有效性。

### 1 双向DC-DC变换器充/放电切换

由于光伏、风机等分布式发电不稳定,直接影响电网供电安全。直流微电网就地发电和消纳,具有结构简单、控制容易、电能转换环节少和鲁棒性强等特点,减小了对大电网的冲击,且比交流微电网的效率更高。图1为以光伏和储能为能源的直流微电网。光伏发电单元采用最大功率点跟踪控制,等效为不可控的电流源;储能单元负责平衡直流微电网功率平衡和电压稳定。

储能双向DC-DC变换器采用Buck/Boost拓扑, $S_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 是功率半导体器件IGBT, $u_{k1}$ 和 $u_{k2}$ 分别是 $S_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 的控制量。 $u_{k1}=1$ 表示功率开关 $S_{k1}$ 导通,功率开关 $S_{k2}$ 关断; $u_{k1}=0$ 表示功率开关 $S_{k1}$ 关断,功率开关 $S_{k2}$ 导通。通常 $u_{k1}=1-u_{k2}$ ,防止 $S_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 同时导通,导致短路。

双向DC-DC变换器的输出电流为

$$i_{ok} = \frac{v_{ok} - v_{pec}}{r_k} \quad (1)$$

式中: $v_{ok}$ 为变换器高压侧电压; $i_{ok}$ 为变换器高压

侧电流; $v_{pec}$ 为直流母线电压; $r_k$ 为变换器的线路阻抗。

从式(1)可以看出,当母线电压大于变换器高压侧电压,变换器处于降压模式,给储能电池充电;当母线电压小于变换器高压侧电压,变换器处于升压模式,储能电池向外放电。

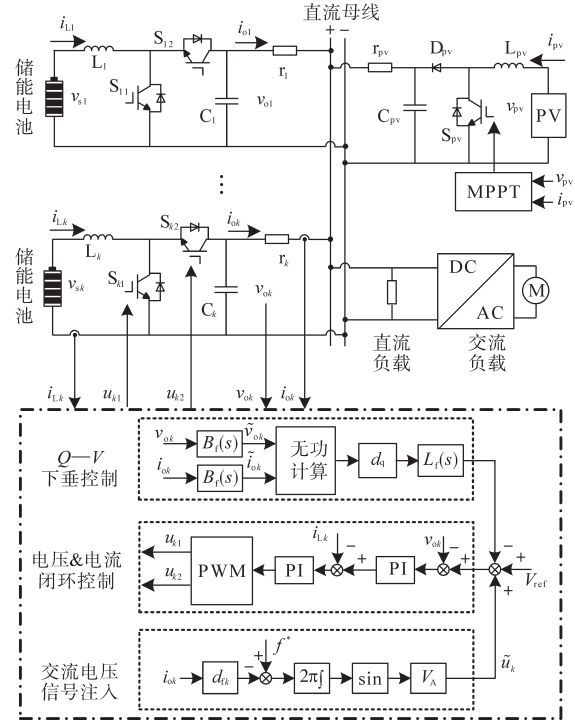


图1 直流微电网结构及控制方法

Fig.1 Structure and control method of DC microgrid

由于 $v_{ok} = v_{sk}/(1-d_k)$ ,充/放电切换条件为

$$\begin{cases} \frac{v_{sk}}{(1-d_k)} > v_{pec} & \text{Boost} \\ \frac{v_{sk}}{(1-d_k)} < v_{pec} & \text{Buck} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $d_k$ 为功率半导体器件 $S_{k1}$ 的占空比。

控制功率半导体器件 $S_{k1}$ 和 $S_{k2}$ 的导通时间可以实现双向变换器的充/放电的切换。当光伏发电功率小于负载需求时,直流母线电压小于变换器高压侧电压,变换器工作在升压模式;当光伏发电功率大于负载需求时,直流母线电压大于变换器高压侧电压,双向DC-DC变换器工作在降压模式。

### 2 注入交流电压小信号

由于线路阻抗难以保持相等,根据式(1),并联变换器的输出电流会分配不均。参考交流系统中逆变器的有功功率—频率下垂控制,在双向DC-DC变换器的高压侧电压中注入交流电压小

信号:

$$\tilde{u}_k = V_A \sin \varphi_k \quad (3)$$

其中

$$\varphi_k = 2\pi \int f_k dt$$

式中:  $V_A$  为交流电压的幅值;  $\varphi_k$  为交流电压的相位;  $f_k$  为交流小信号的频率。

注入交流电压信号的频率与DC-DC变换器高压侧电流呈现下垂特性:

$$f_k = f^* - d_{ik} i_{ok} \quad (4)$$

式中:  $f^*$  为额定频率;  $d_i$  为  $I-f$  下垂系数。

如图1所示,通过电压闭环将交流信号注入到变换器高压侧电压中。

频率—电流下垂曲线如图2所示,双向DC-DC变换器分为恒流放电、频率—电流下垂和恒流充电三种模式。频率—电流下垂区又分为升压放电和降压充电:当  $f_k < f^*$  时,变换器升压模式;当  $f_k > f^*$  时,变换器降压模式。在恒流区内变换器均运行在最大电流状态,不需要均流控制。在频率—电流下垂区内,只要保证各变换器的频率一致,即可实现各变换器的电流按比例分配,比例为下垂系数反比,即

$$\frac{i_{oj}}{i_{ok}} = \frac{d_{ik}}{d_{ij}} \quad (5)$$

式中:下标  $j, k$  为第  $j$  和第  $k$  个变换器。

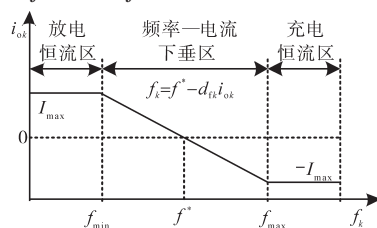


图2 频率—电流下垂曲线

Fig.2 Frequency—current droop curve

### 3 Q—V下垂控制

根据式(1)可知,调节变换器电流需要改变变换器高压侧电压,但交流小信号的频率并不能改变电压。因此利用交流电压产生的无功功率进行Q—V下垂控制。

为了求出交流小信号的无功功率,通过带通滤波器提取交流小信号,如下式:

$$\begin{cases} \tilde{v}_{ok} = B_f(s) v_{ok} \\ \tilde{i}_{ok} = B_i(s) i_{ok} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $B_f(s)$  为带通滤波器。

交流小信号的无功功率为

$$Q_k = |\tilde{v}_{ok}| |\tilde{i}_{ok}| \sin(\angle \tilde{v}_{ok} - \angle \tilde{i}_{ok}) \quad (7)$$

利用无功功率—直流电压的下垂控制改变

双向DC-DC变换器高压侧直流电压:

$$v_{ok} = [V^* - d_q Q_k L_f(s)] T(s) \quad (8)$$

式中:  $V^*$  为电压给定值;  $d_q$  为无功—直流电压的下垂系数;  $L_f(s)$  为一阶低通滤波器;  $T(s)$  为变换器电压闭环传递函数。

根据文献[19],还可以计算出交流电压小信号产生的无功功率,如下式:

$$Q_k = -\frac{|\tilde{v}_{ok}| |\tilde{v}_{pcc}|}{r_k} \sin \frac{2\pi(f_k - f_{pcc})}{s} \quad (9)$$

式中:  $f_{pcc}$  为母线电压交流分量的频率。

只要频率  $f_k$  和  $f_{pcc}$  存在偏差,那么无功功率就会变化,直到频率一致,也间接地保证了电流按比例分配。

除了变换器间交流电压相位不同产生交流环流和无功功率,负载也会产生无功。负载产生的无功功率不仅不能调节电流,还会引起电压跌落。因此还需无功功率补偿器保证容性负载和感性负载不从母线吸收无功功率<sup>[20]</sup>。相比交流系统,注入的交流电压较小,需要的无功功率补偿器也非常小。

### 4 实验验证

为验证基于交流电压小信号均流策略的有效性,搭建了基于Starsim HIL的硬件在环实验平台,如图3所示。



图3 实验装置

Fig.3 Experimental device

双向DC-DC变换器的拓扑结构由基于NI-PXIe-FPGA-7846R的Starsim HIL实时仿真,仿真步长为  $1 \mu s$ ;控制策略则采用基于NI-PXIe-8821的Starsim RCP控制器来实现,开关频率和采样频率为  $20 \text{ kHz}$ 。变换器参数和控制参数为:参考电压  $V_{ref}=500 \text{ V}$ ,输入电压  $v_s=300 \text{ V}$ ,变换器电感  $L=1.5 \text{ mH}$ ,变换器电容  $C=470 \mu\text{F}$ ,负载电阻  $R_{load}=50 \Omega$ ,电流控制器比例系数  $k_{pi}=5$ ,电流控制器积分系数  $k_{ii}=200$ ,电压控制器比例系数  $k_{pv}=1$ ,电压控制器积分系数  $k_{iv}=100$ ,额定频率  $f^*=50 \text{ Hz}$ ,线路电阻  $r_1=1.5 \Omega$ ,线路电阻  $r_2=0.75 \Omega$ ,交流电压幅值  $V_A=5 \text{ V}$ ,低通滤波器截止频率  $\omega_c=20 \text{ rad/s}$ ,



$I-f$ 下垂系数  $d_{if}=0.3$ ,  $Q-V$ 下垂系数  $d_{qv}=1$ 。实验采用两台同容量的 Buck/Boost 变换器,分别进行了放电启动、充电启动和充/放电切换实验。

图 4a 是 Buck/Boost 变换器放电启动实验波形图,光伏发电功率为 9.7 kW,初始负载大小为  $R_{load}=17 \Omega$ 。在变换器中注入交流电压信号前,变换器电流按线路阻抗的反比 2:1 分配。注入交流电压小信号后,变换器 1 的电流从 6.3 A 开始减小,变换器 2 的电流从 3.7 A 开始增大,经过 75 ms 电流均趋于 5 A。

图 4b 是 Buck/Boost 变换器充电启动实验波形图,光伏发电功率为 9.7 kW,初始负载大小为  $R_{load}=89 \Omega$ 。在变换器中注入交流电压信号前,变换器电流按线路阻抗的反比 2:1 分配。注入交流电压小信号后,变换器 1 的电流从 -6.3 A 变为 -5 A,变换器 2 的电流从 -3.7 A 变为 -5 A,动态调节时间为 150 ms。图中负号仅表示电流方向。可以看出,交流电压信号注入后,并没有立刻开始均流,导致启动时间比放电启动时间长。

图 4c 是 Buck/Boost 变换器充/放电切换实验波形图,光伏发电功率为 9.7 kW,初始负载大小为  $R_{load}=90 \Omega$ ,光伏功率大于负载需求,双向 DC-

DC 变换器处于充电模式。当负载变为  $R_{load}=15 \Omega$ ,光伏功率小于负载需求,双向 DC-DC 变换器切换为放电模式,动态调节时间为 170 ms。切换前后均能保持电流一致。

双向 DC-DC 变换器的放电启动、充电启动和充/放电切换实验验证了基于交流电压小信号下垂控制的有效性。

### 5 结论

针对直流微电网中储能双向 DC-DC 变换器的并联均流问题,在直流电压中注入交流电压小信号,利用交流小信号产生的无功功率调节高压侧电压,保证全局频率一致,间接地实现了变换器均流控制。双向 DC-DC 变换器的放电启动、充电启动和充/放电切换实验结果表明,该方法在不需通信的前提下提高了电流分配精度,同时引起的电压偏差较小。

#### 参考文献

- [1] Jin Z, Sulligoi G, Cuzner R, et al. Next-generation shipboard DC power system; introduction smart grid and DC microgrid technologies into maritime electrical networks[J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(2): 45-57.
- [2] 马伟明. 电力电子在舰船电力系统中的典型应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 1-7.  
Ma Weiming. Typical applications of power electronics in naval ship power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 1-7.
- [3] Nasirian V, Davoudi A, Lewis F L, et al. Distributed adaptive droop control for DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 944-956.
- [4] Nasirian V, Moayedi S, Davoudi A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 30(4): 2288-2303.
- [5] 高扬,艾芊,郝然,等. 交/直流混合电网的多智能体自律分散控制[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1158-1164.  
Gao Yang, Ai Qian, Hao Ran, et al. Autonomous decentralized control of multi-agent system for AC/DC hybrid grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1158-1164.
- [6] Guerrero J M, Chandorkar M, Lee T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part I: Decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [7] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—Part II: Power quality, energy storage, and AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263-1270.
- [8] 刘云,荆平,李庚银,等. 直流电网功率控制体系构建及实现

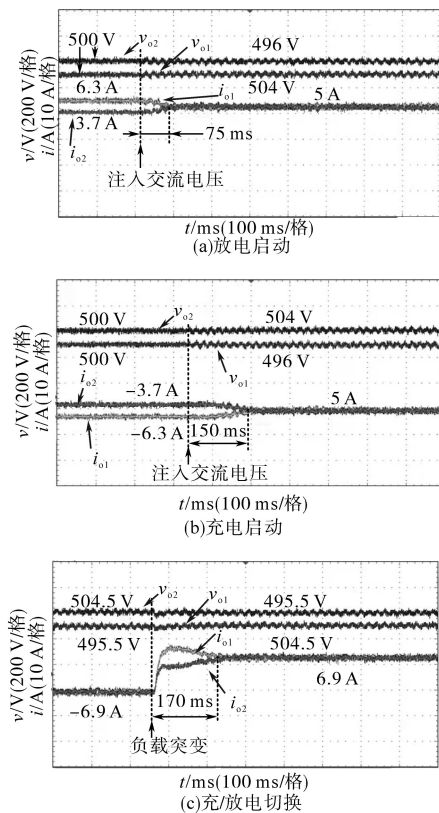


图4 实验波形图

Fig.4 Experimental waveforms

- 方式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3803-3814.
- Liu Yun, Jing Ping, Li Gengyin, *et al.* Research on the structure and implementations of the DC grid power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3803-3814.
- [9] Dragičević T, Guerrero J M, Vasquez J C, *et al.* Supervisory control of an adaptive-droop regulated demicrogrid with battery management capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 695-706.
- [10] Wang P, Lu X, Yang X, *et al.* An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.
- [11] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
- Zhi Na, Zhang Hui, Xiao Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [12] 刘琛, 赵晋斌, 王闪闪, 等. 基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2584-2591.
- Liu Chen, Zhao Jinbin, Wang Shanshan, *et al.* A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.
- [13] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, *et al.* Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [14] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 37-46.
- Lu Xiaonan, Sun Kai, Huang Lipei, *et al.* Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 37-46.
- [15] Shafiee Q, Stefanovi C, Dragičević T, *et al.* Robust networked control scheme for distributed secondary control of islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5363-5374.
- [16] Shafiee Q, Guerrero J M, Vasquez J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—A novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [17] Lu X, Guerrero J M, Sun K, *et al.* An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [18] Choi H J, Jung J H. Enhanced power line communication strategy for DC microgrids using switching frequency modulation of power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4140-4144.
- [19] Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, *et al.* Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [20] 罗培, 孙吉浩. 有源配电网动态无功优化解耦方法研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1323-1333.
- Luo Pei, Sun Jihao. Research on decoupling method for dynamic reactive power optimization of active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1323-1333.

收稿日期:2021-01-14

修改稿日期:2021-03-09