

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.05.022

基于低带宽通信直流微网变换器自适应下垂均流技术研究^{*}

黄桂根,王腾飞,王慧馨,马凯莉,王正仕^{*}

(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对直流微电网的负载均流控制问题,对微电网的稳态均流、动态均流和母线电压稳定等方面进行了研究,对微电网常用均流控制策略进行了归纳,提出了基于低带宽通信的自适应下垂法。为了克服传统下垂控制的缺陷并获得良好的动态均流性能,增加了两个调整环,利用电流调整环调节下垂系数实现了稳态和动态均流,电压调整环抬升了母线电压。因控制均在本地实现,无需中心控制器,可靠性高。对不同的均流控制方案进行了对比实验。研究结果表明,静态均流误差 $<3\%$,动态均流误差 $<4\%$,该控制策略能实现直流微电网的动稳态均流和母线电压跌落补偿。

关键词:直流微网;自适应下垂法;动态均流;低带宽通信

中图分类号:TM727

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)05-0620-05

Research of adaptive droop current-sharing technique for DC micro-grid converters based on low-bandwidth communication

HUANG Gui-gen, WANG Teng-fei, WANG Hui-xin, MA Kai-li, WANG Zheng-shi

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at realizing load current-sharing of dc micro-grid, static current-sharing, dynamic current-sharing, dc-bus voltage regulation and common current - sharing methods were researched, and the adaptive droop based on low bandwidth communication was proposed. In order to overcome the limitations of traditional droop control and to achieve excellent dynamic current-sharing performance, two regulators were added, with a current regulator to fine ne-tune droop coefficient and a voltage regulator to adjust voltage set point. Control was done locally without center controller, which was of high reliability. Comparative experiments of different control methods were presented. The results indicate that static current error is smaller than 3% and dynamic current error is smaller than 4% . The proposed control method can effectively realize load current-sharing and restore the dc-bus voltage.

Key words: DC micro-grid; adaptive droop control; dynamic current-sharing; CAN communication

0 引言

随着光伏、风力、生物质发电等新能源发电技术快速发展,分布式电源并网要求势在必行。直流微电网使用直流配电方式,不需要控制电压相位和频率,具有高可靠性、高效率、控制简单以及易于接入新能源等优

点^[1],为分布式电源并网提供了有效的解决途径。随着配电系统的发展,直流微电网将比交流微电网更具优势^[2]。

直流微网变换器的均流控制主要可归纳为两类,主从控制和下垂控制。主从控制由于高成本、高复杂度、低可靠性的缺点,在微电网中应用受限。下

收稿日期:2015-12-24

基金项目:浙江省公益性工业技术应用研究计划项目(2015C31121)

作者简介:黄桂根(1991-),男,江西赣州人,硕士研究生,主要从事蓄电池充电器、DC/DC变换器方面的研究。E-mail: ytcx100@sina.com

通信联系人:王正仕,男,副教授,硕士生导师。E-mail: wzs@zju.edu.cn

垂控制具有冗余性好、控制简单、可靠性高的优点,但带来母线电压跌落,因此对电压质量造成一定的影响^[3];并且,微网结构、线路阻抗发生变化时,均流精度下降。因此,为了提高传统下垂法均流精度并抑制直流母线电压跌落,国内外许多学者均展开了研究。

文献[4-5]提出一种分段下垂控制方法,在轻载和满载时采用两个不同的下垂系数,重载时减小下垂系数;文献[6-7]更进一步,根据负载大小连续调节下垂系数。以上文献提出的改进下垂方案可改善负载调整率,但均流精度会受影响。文献[8]同步地提高每个变换器的输出基准电压抬升母线电压,但并未考虑到变换器切换和负载变化的情况。文献[9]引入低带宽通信来调整基准电压,可实现稳态均流和母线电压抬升,其缺陷在于下垂系数固定;负载变化时,需依赖通信重新调整,动态响应慢,动态均流性能不佳(下文简称此法为改进下垂法)。

本研究搭建 2 台 300 W 直流变换器样机并联运行,每台变换器通过低带宽通信获取相邻变换器信息,调节下垂系数及电压扰动量,实现负载的动稳态均流和母线电压跌落补偿。

1 传统下垂法分析

微网中多个直流变换器并联运行时,由于它们的输出特性不可能完全一致,输出阻抗低的变换器将提供大部分甚至全部电流,从而造成并联运行的不均流。下垂法通过增大变换器输出阻抗,使各变换器输出特性趋于相近,来达到均流的目的。

两变换器直流微网系统的简化模型如图 1 所示。

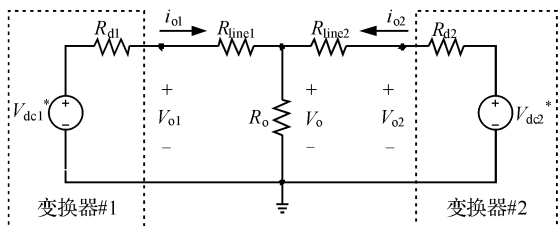


图1 两变换器直流微网的简化模型

下垂控制法可以表示为:

$$V_{oi} = V_{dci}^* - i_{oi} \cdot R_{di} \quad (1)$$

式中: V_{oi} —第 i 个变换器输出电压; V_{dci}^* —输出基准电压; i_{oi} —变换器输出电流; R_{di} —下垂系数值, $i = 1, 2$ 。

一般地,令两变换器基准电压 $V_{dcl}^* = V_{dc2}^*$, 则从图 1 可以推导出:

$$V_o = V_{dcl}^* - i_{o1} \cdot (R_{d1} + R_{line1}) \quad (2)$$

$$V_o = V_{dc2}^* - i_{o2} \cdot (R_{d2} + R_{line2}) \quad (3)$$

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}} = \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

式中: R_i —变换器等效输出阻抗, $i = 1, 2$, 其值等于下垂系数 R_{di} 加上线路阻抗 R_{linei} 。

可知,变换器输出电流与其等效输出阻抗 R_i 成反比, R_i 越大变换器输出电流越小,反之输出电流越大,如图 2(a) 所示。要实现负载电流在两变换器间均分,需要满足 $R_1 = R_2$ 。

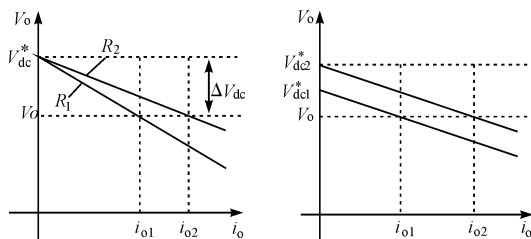


图2 直流微网下垂曲线

在系统较小时,线路阻抗往往数值很小,因此选择一个稍大的下垂系数,则满足 $R_{di} > R_{linei}$, 式(4)可改写为:

$$\frac{i_{o1}}{i_{o2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}} \approx \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (5)$$

只要两变换器下垂系数 $R_{d1} = R_{d2}$, 即可实现 $i_{o1} = i_{o2}$ 。然而,上述假设只对小系统成立,系统较大时,线路阻抗值不能忽略,式(5)不成立,从而 $i_{o1} \neq i_{o2}$, 电流分配不均。

当负载突然加重时,输出阻抗低的变换器将承担大部分的电流,甚至超过其额定输出能力,造成微网母线电压突降甚至变换器损坏。因此,线路阻抗不仅影响稳态均流精度,也会恶化动态响应。

此外,从图 2(a) 可知负载变大时,母线电压跌落 ΔV_{dc} 较大,有可能超出直流母线电压的最大变化范围,这也是下垂法的固有缺陷之一。另外,由于采样存在偏差,两变换器的基准电压 V_{dci}^* 难以做到一致,由图 2(b) 知,基准电压的偏差也会造成输出电流的偏差,导致均流精度下降。

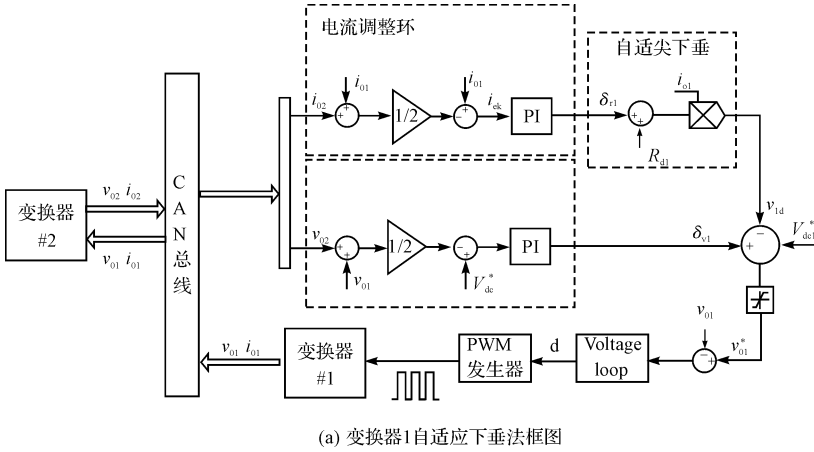
2 自适应下垂法

为了解决传统下垂法母线电压跌落以及均流性能易受线路阻抗影响的问题,本研究提出了基于低带宽通信的自适应下垂法。通过 CAN 总线交换相邻变换器的电压电流信息,自适应地调节下垂系数使两变换器等效输出阻抗相等实现稳态和动态均流,并更新电压

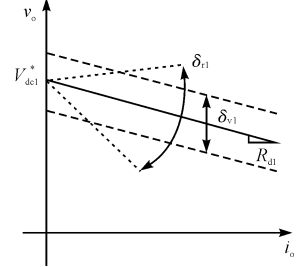
扰动量来抬升母线电压。自适应下垂法的具体控制策略如图(3)所示。

如图3(a)所示,自适应下垂法包括电流和电压两

个调整环来改变变换器的输出特性。两个变换器在控制上是完全一致的,本研究以变换器1为例阐述自适应下垂法的工作原理。



(a) 变换器1自适应下垂法框图



(b) 自适应下垂法效果图

图3 自适应下垂法控制策略

2.1 电流调整环 & 动态均流

输出电流 i_{o1} 与变换器平均电流的差值 i_{ek} 可反映电流偏差,经 PI 运算得到下垂系数扰动量 δ_{r1} ,在初始下垂系数 R_{d1} 基础上叠加 δ_{r1} ,得到更新的下垂系数,效果如图3(b)所示。

$$R_{d1}(k+1) = R_{d1}(k) + \delta_{r1} \quad (6)$$

若 $i_{o1} > i_{o2}$,则 $i_{ek} > 0$, $\delta_{r1} > 0$,变换器1下垂系数增大,输出阻抗增大,最终将导致输出电流 i_{o1} 减小;反之亦然。只要两变换器输出电流存在偏差,PI 控制器不断调整下垂系数,直至消除偏差,达到均流。

电流调整环自适应调节下垂系数,可克服线路阻抗影响,使变换器输出阻抗相等。每个变换器输出特性调整一致后,下垂系数适应微网系统,不再变化。即使负载发生突变,电流也能动态均分。因此,自适应下垂法能同时实现稳态和动态均流。

2.2 电压调整环

两变换器平均电压与母线基准电压 V_{dc}^* 的差值反映了母线电压跌落量,经 PI 运算得到电压扰动量 δ_{v1} ,此扰动量将叠加到输出电压参考,用来抬升母线电压,效果如图3(b)所示。为了维持母线电压在限定的范围内,引入限幅器环节限制输出电压参考 V_{o1}^* 的上、下限:

$$v_{o1}^* = V_{dc}^* - v_{1d} + \delta_{v1} \quad (7)$$

$$v_{1d} = i_{o1} \cdot (R_{d1} + \delta_{r1}) \quad (8)$$

从式(7,8)可知, δ_{r1} 可增大输出电压参考,抵消下垂控制带来的电压降落 v_{1d} ,使输出电压参考重新接近母线基准电压 V_{dc}^* ,进而补偿电压跌落。只要变换器平均输出电压低于 V_{dc}^* ,PI 控制器将不断调整电压扰

动量 δ_{v1} ,直至平均电压达到 V_{dc}^* 。

改进下垂法也基于低带宽通信构建了电流、电压 PI 调整环,可实现稳态均流和母线电压补偿。但两个调整环输出均为电压扰动信号,下垂系数始终为初值固定不变,其控制效果可参考图3(b) δ_{r1} 对变换器 $V-I$ 下垂特性的影响。该方案仅调整输出电压基准值,不改变变换器输出特性。当负载变化时,需要依赖通信重新计算电流调整环和电压调整环,动态响应慢,动态均流性能差。

2.3 CAN 总线低带宽通信

CAN 是一种多主方式串行数控通讯总线,具有实时性、高可靠性、灵活性、高抗电磁干扰性等优点。由 CAN 总线构成的通信网络中,理论上可以挂接无数个节点,非常适合微网并联系统的使用。

对于主从控制,主机利用高速通信实时发送电流参考给从机,一旦主机或者通信出现问题,系统将无法正常运行,可靠性低。传统下垂法无需通信,分布式电源自主控制,可靠性高。自适应下垂法仅利用通信仅引入了两个扰动量 δ_{r1} 、 δ_{v1} 改进控制效果,变换器仍实现本地自主控制,因此低带宽通信(LBC)即可满足控制的需要。本研究设置通信周期为 10 ms,开关频率 f_s 为 40 kHz,也即每 400 个开关周期通信一次。

3 实验及结果分析

为了验证提出的自适应下垂法的可行性,本研究设计了 2 台基于 DSP28035 的数字化直流变换器并联运行,构建母线电压为 48 V 的直流微网。变换器采用隔离半桥电路拓扑,主要参数如下:输入电压 $V_{in} =$

200 V,变压器原副边匝数比 $N_{ps} = 1.25$,滤波电感 $L_o = 120\text{ }\mu\text{H}$,滤波电容 $C_o = 200\text{ }\mu\text{F}$,两变换器基准电压 $V_{dc1}^* = V_{dc2}^* = 48\text{ V}$ 。

图4(a)、(b)对比研究了自适应下垂法的均流效果。图4(a)负载电流 $i_o = 6\text{ A}$,初始阶段采用传统下

垂法均流,两变换器输出电流偏差 $i_{o2} - i_{o1} = 2.2\text{ A}$,均流误差大;加入自适应下垂法后,经过 0.55 s 的调节时间,两变换器输出电流均为 3 A ,电流偏差值趋于零,实现了负载均流。图4(b)负载电流 $i_o = 10\text{ A}$,同样验证了均流控制方法的有效性。

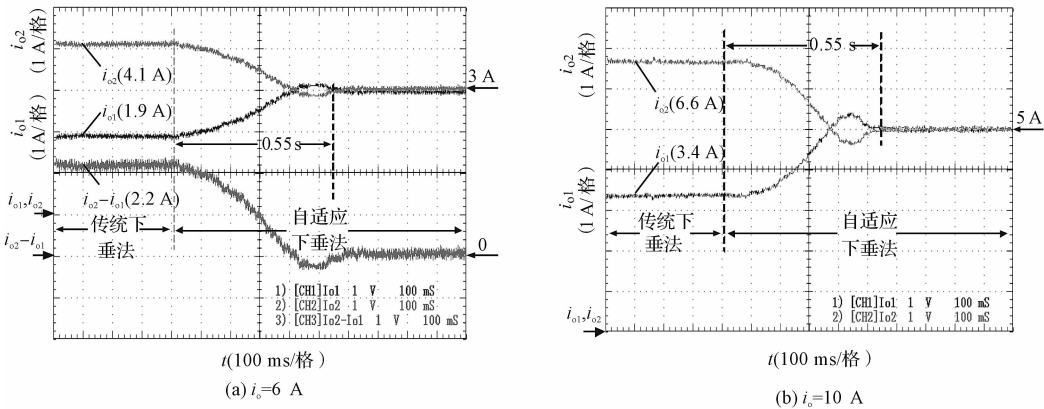


图4 传统下垂法与自适应下垂法对比

表1 两种均流控制稳态输出特性

	输出电流	i_{o1}/A	i_{o2}/A	均流误差 Cserror	V_{o1}/V	V_{o2}/V	ΔV_{dc}	$\frac{\Delta V_{dc}}{V_{dc}}/\%$
传统下	$i_o = 6\text{ A}$	1.90	4.10	73.3%	47.50	47.44	0.53	1.10%
垂法	$i_o = 10\text{ A}$	3.40	6.60	64.0%	47.06	47.00	0.97	2.02%
自适应	$i_o = 6\text{ A}$	2.96	3.04	2.67%	48.02	47.94	0.02	0.02%
下垂法	$i_o = 10\text{ A}$	4.94	5.06	2.40%	48.04	47.92	0.02	0.02%

两种控制策略的稳态输出特性如表1所示。负载电流 i_o 从 6 A 增至 10 A ,跌落电压占母线电压比例 $\Delta V_{dc}/V_{dc}$ (下文简称为跌落比) 从 1.1% 增至 2% ,跌落比随负载变大显著增大,这是传统下垂法的固有缺陷。采用自适应下垂法后,两台变换器的输出电压均增大并稳定在额定值 48 V ,跌落比从 2% 下降到 0.02% ,实验结果证明了改进下垂法抬升母线电压的能力。同时,采用自适应下垂法,稳态均流误差从超过 50% 减小到 3% 以内,均流精度明显提高。

图5(a)、5(b)展示了自适应下垂法负载突变时的响应。图5(a)负载电流 i_o 从 5 A 突增至 10 A ,单台变换器输出电流从 2.5 A 增大到 5 A 的过程中,两电流变化趋势一致,始终保持近似相等,最大差值仅 0.3 A ,即动态均流误差仅 3% ;经过 $100\text{ }\mu\text{s}$ (4个开关周期) 便达到稳态,动态响应快。图5(b)负载电流 i_o 从 10 A 突减到 5 A ,切载的过程同图5(a)类似,两个切载实验验证了自适应下垂法优良的动态均流性能。

图6(a)、6(b)展示了采用改进下垂法的负载突变时的反应。从图可知,该改进下垂法稳态时两变换器电流精确分配,稳态均流精度高。图6(a)负载电流

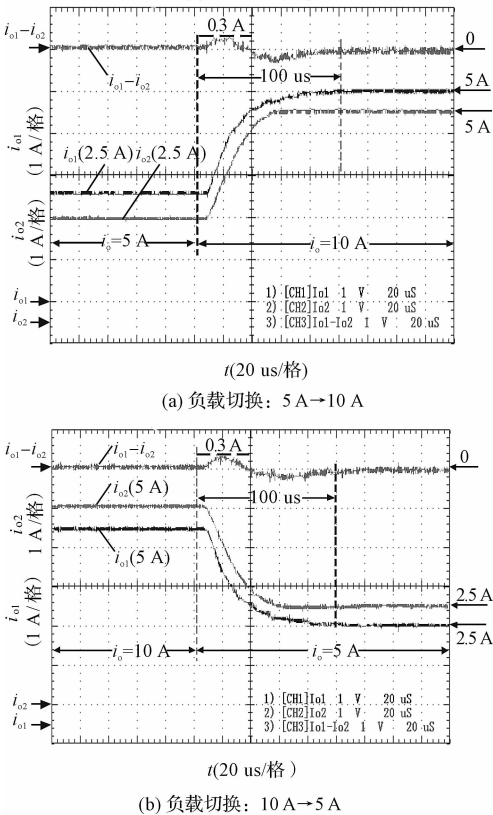


图5 自适应下垂法负载阶跃变化动态响应

i_o 从 5 A 突增至 10 A, 两变换器动态输出电流不平衡, 最大差值达到 1.5 A, 动态均流误差达到 15%, 动态均流效果差; 动态过程经过 500 ms 才能达到稳定, 动态响应慢。图 6(b) 负载电流 i_o 从 10 A 突减到 5 A, 两变换器最大电流差为 1 A, 动态过程持续 500 ms。对比图 5、图 6 证明了自适应下垂法在负载阶跃变化时, 优良的动态均流性能。

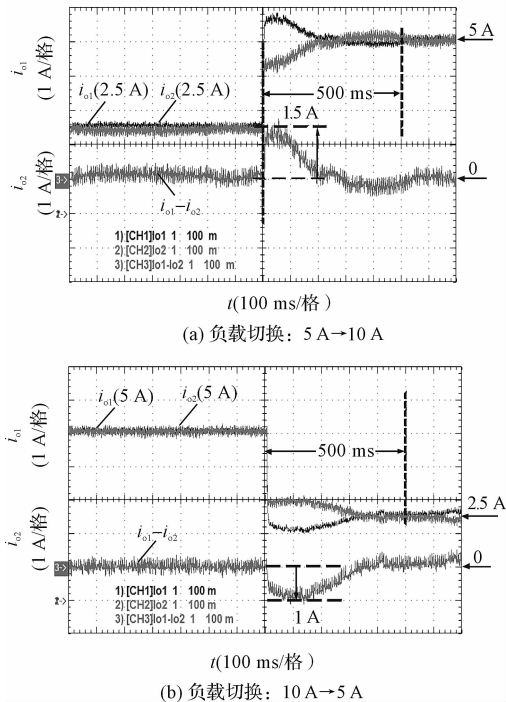


图 6 改进下垂法负载阶跃变化动态响应

4 结束语

本研究从传统下垂法原理出发, 分析其均流性能易受线路阻抗和负载影响以及重载时母线电压跌落的缺点。针对下垂法缺点, 提出了基于低带宽通信的自适应下垂法, 构造电流调整环调节下垂系数、电压调整环抬升参考电压, 提高均流精度同时补偿母线电压跌落, 并实现系统动态均流, 动态误差小于 3%。最后搭建了 2 × 300 W 实验样机并联运行, 验证了提出控制策略的有效性。

参考文献 (References):

- [1] Anand S, Fernandes B G. Modified droop controller for paralleling of dc - dc converters in standalone dc system [J]. **IET Power Electronics**, 2012, 5(6): 782-789.
- [2] 毕大强, 赵润富, 葛宝明, 等. 直流微电网能量控制策略的研究[J]. **电源学报**, 2014, 12(1): 1-7.
- [3] 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.
- [4] YANG S Y, ZHANG C W, ZHANG X, et al. Study on the control strategy for parallel operation of inverters based on adaptive droop method [C]// **IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**, Singapore: IEEE, 2006: 1-5.
- [5] MAJUMDER R, GHOSH A, LEDWICH G, et al. Power System Stability and Load Sharing in Distributed Generation [C]// **Power System Technology and IEEE Power India Conference**, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on. New Delhi: IEEE, 2008: 1-6.
- [6] YAO W, CHEN M, GAO M, et al. A wireless load sharing controller to improve the performance of parallel-connected inverters [C]// **Applied Power Electronics Conference and Exposition**. APEC 2008. Austin: TX IEEE, 2008: 1628-1631.
- [7] YAO W, CHEN M, GAO M, et al. Development of communicationless shot-swap paralleling for single-phase UPS inverters based on adaptive droop method [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2009, 27(8): 1283-1287.
- [8] DAVOUDI A, LEWIS F L, GUERRERO J M. Distributed Adaptive Droop Control for DC Distribution Systems [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2014, 29(4): 944-956.
- [9] GUERRERO J M, Kai Sun, VASQUEZ J C. An Improved Droop Control Method for DC Micro-grids Based on Low Bandwidth Communication With DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy [J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2013, 29(4): 1800-1812.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

黄桂根, 王腾飞, 王慧馨, 等. 基于低带宽通信直流微网变换器自适应下垂均流技术研究[J]. **机电工程**, 2016, 33(5): 620-624.

HUANG Gui-gen, WANG Teng-fei, WANG Hui-xin, et al. Research of adaptive droop current-sharing technique for DC micro-grid converters based on low-bandwidth communication [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2016, 33(5): 620-624. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>