

Voltage Control Strategy of DC Microgrid Based on Voltage Compensation

Ning Dai, Hongwei Li, Qingzhuo Liu

School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan
Email: lhwwmail@126.com

Received: Apr. 8th, 2019; accepted: Apr. 22nd, 2019; published: Apr. 29th, 2019

Abstract

In the research of voltage control method of DC microgrid, droop control has many advantages such as high reliability and good practical effect, and has been widely used. However, the conventional droop control method has a voltage difference, and the voltage cannot be adjusted without deviation. Therefore, secondary control is required to perform voltage offset compensation. In this paper, by compensating the converter and DC line loss, the reference value of the droop control is updated in real time to realize voltage deviation compensation and shorten the voltage recovery time. The six-terminal DC microgrid is built in MATLAB for simulation analysis. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the control strategy.

Keywords

DC Microgrid, Droop Control, Hierarchical Control, Voltage Deviation Compensation

基于电压偏差补偿的直流微电网电压控制策略

戴 宁, 李红伟, 刘青卓

西南石油大学, 电气信息学院, 四川 成都
Email: lhwwmail@126.com

收稿日期: 2019年4月8日; 录用日期: 2019年4月22日; 发布日期: 2019年4月29日

摘 要

在直流微电网的电压控制的方法研究中, 下垂控制具有可靠性高、实用效果好等诸多优点, 得到了广泛的应用。但是传统的下垂控制方法存在电压偏差, 不能实现电压的误差调节, 因此需要进行二次控制以减少甚至消除电压偏差。本文通过补偿换流器和直流线路损耗的方式, 对下垂控制的参考值进行实时更

新, 实现电压偏差补偿, 并且缩短了电压恢复的时间。在MATLAB中搭建六端直流微电网进行仿真分析, 仿真结果验证了该控制策略的可行性和有效性。

关键词

直流微电网, 下垂控制, 分层控制, 电压偏差补偿

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来能源的利用逐渐向清洁能源过渡, 但由于光伏、风力等分布式电源具有较大的波动性与间歇性, 会威胁交流主网的稳定运行, 降低主网的电能质量[1] [2] [3] [4]。为解决这一问题, 提出了微电网的概念。其中直流微电网方便光伏发电等直流电源的接入, 也有利于直流工业负载和直流负荷的接入, 省去了部分能量变换装置, 降低了转换损耗, 提高了能量的利用效率[4] [5]。

对于直流微电网来说, 只需要考虑系统有功功率的平衡, 而直流母线电压就是衡量系统有功功率平衡的唯一指标[6]。近年来随着对直流电压控制方面研究的深入, 下垂控制方法具有更高的可靠性和即插即用的性能, 并且系统扩容更加方便, 因此得到了广泛的应用[7]。但是传统的下垂控制存在电压偏差方面的局限, 因此提出二次控制对电压偏差的进行补偿。

对于补偿电压偏差, 文献较多地采用了调节下垂曲线的方法, 例如文献[8]采用了平均电压、电流双补偿的方法, 通过补偿下垂曲线的纵截距实现电压恢复的能力。文献[9]采用混合补偿的方式, 提出了一种可以应对快速负载电流变化的改进下垂控制方法。文献[10]采用了变下垂系数和动态电压补偿方法的形式稳定母线电压。文献大多都是通过平移下垂曲线、调整下垂系数或者两者同时进行补偿的方法, 改变下垂曲线的方法较为复杂, 且需要一定的时间。而本文通过补偿换流器和直流线路的损耗的方式, 不需要改变下垂曲线或下垂系数, 在二次控制中对工作在下垂控制的换流器的直流电压和功率参考值进行实时更新, 可以缩短电压恢复的时间, 降低控制的复杂性, 提高电压偏差补偿的快速性及准确性。

2. 下垂控制

直流电压下垂控制方法是通过在输出电流增加时线性减小输出电压来实现的, 即 V-I 下垂控制, 从直观上表现为电压的“下垂” [11], 如图 1 所示。此外, 功率电压(P-V)下垂方法也是主要控制的常见形式之一[12]。本文以 V-I 下垂方法来介绍。

通常在 V-I 下垂控制方法中, 采用虚拟电阻或下垂系数, 输出电压 U_{dc} 由输出电流 I_{dc} 和下垂系数 k 的大小决定, 其控制方法表述为:

$$U_{dc} = U_{dc\text{ref}} - k \cdot I_{dc} \quad (1)$$

下垂系数的大小决定了换流器输出功率的大小。功率较大的换流器相对应的下垂系数比较小, 输出电流较大, 因此对直流电压的调节能力更强[11]。

3. 直流微电网电压控制策略

本文研究的六端直流微电网拓扑结构如图 2 所示, 由分布式电源(风光发电单元)、并网单元、储能单

元(蓄电池)以及交直流负荷单元组成。

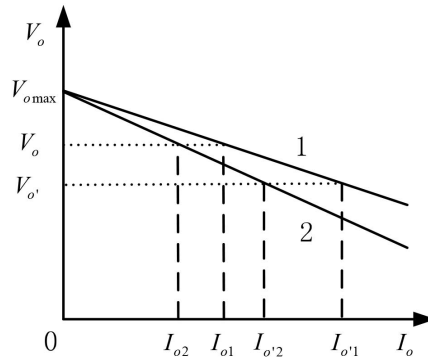


Figure 1. Principle of droop control
图 1. 下垂控制原理图

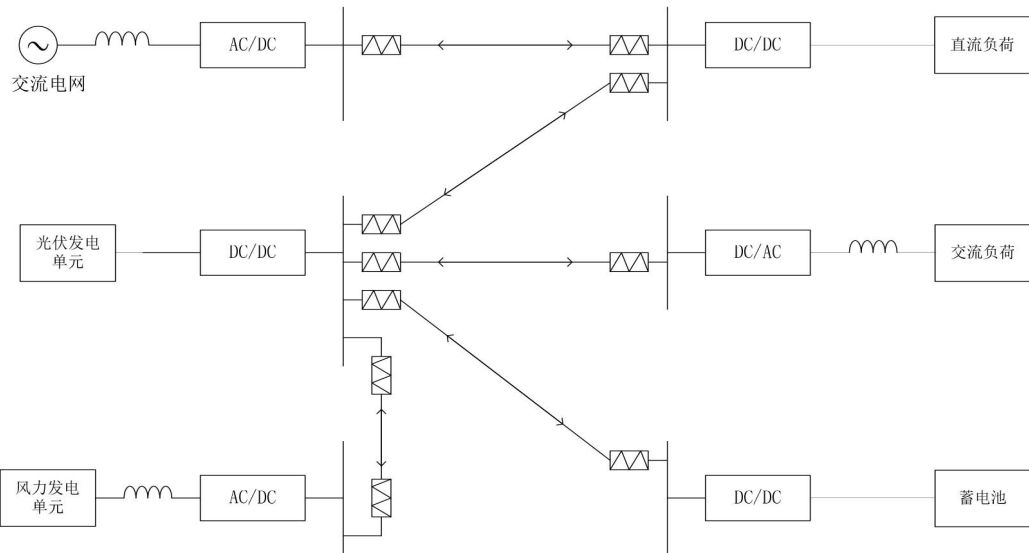


Figure 2. Six-terminal DC microgrid topology
图 2. 六端直流微电网拓扑结构图

在该系统中，调压单元为交流主网和蓄电池。由于并网换流器和蓄电池的功率均可以双向流动，因此在其电压下垂控制中的直流电流有正有负，为两象限下垂特性，如图 3 所示。其中， ΔU_{dc} 表示直流电压允许变化量的最大值， I_{dc_min} 和 I_{dc_max} 表示换流器直流侧电流的限流值。

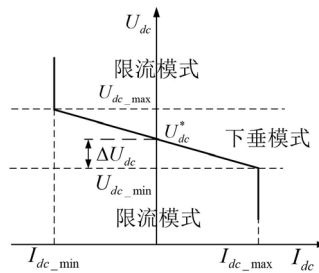


Figure 3. Drooping characteristics of the regulating unit
图 3. 调压单元的下垂特性

相比而言, 交流主网比蓄电池具有较强的功率调节能力, 可以提供更多的功率, 因此并网换流器的下垂系数应该比储能换流器的下垂系数更小。并网换流器和储能换流器的下垂控制特性可以表示为[13]:

$$U_{dc_G} = U_{dcref_G} - k_G \cdot I_{dc_G} \quad (2)$$

$$U_{dc_B} = U_{dcref_B} - k_B \cdot I_{dc_B} \quad (3)$$

公式(2)表示并网换流器的下垂特性, 其下垂系数为 $k_G=0.02/\Delta I_{dc_G}$ 。其中

$$\Delta I_{dc_G} = I_{dcG\max} - I_{dcG\min} \quad (4)$$

式中 $I_{dcG\max} = P_{dcG\max}/U_{dc}$, $I_{dcG\min} = P_{dcG\min}/U_{dc}$, $P_{dcG\max}$ 、 $P_{dcG\min}$ 分别为并网换流器的吸收和发出的功率最大值。公式(3)为储能换流器的下垂特性, 其下垂系数为 $k_B = 0.03/\Delta I_{dc_B}$, 参数的计算方式同并网换流器。

4. 电压偏差补偿

下垂控制方法中母线电压会随着换流器的输出电流或输出功率的增加而降低, 再加上线路损耗, 会产生电压偏差。通过进行二次控制更新电压参考值, 消除实际电压值与参考值之间的偏差, 使调压单元的实际功率可以接近参考值[14]。给出额定电压参考值与更新的电压参考值之间的关系如下:

$$U_{dcref_new} = U_{dcref} + \Delta U_{dc} \quad (5)$$

其中

$$\Delta U_{dc} = U_{dcref} - U_{dc} \quad (6)$$

额定电压参考值 U_{dcref} 和实际电压 U_{dc} 之间的差值, 即 ΔU_{dc} 加到额定电压参考值 U_{dcref} 之后获得更新后的电压参考值 U_{dcref_new} 。由此消除由下垂控制引起的电压偏差。类似地可以得到换流器 i 的功率损耗的补偿, 公式如下:

$$P_{i\ ref_new} = P_{i\ ref} + \Delta P_i \quad (7)$$

$$\Delta P_i = P_{i\ ref} - P_i \quad (8)$$

因此, 包含下垂控制和二次控制的母线电压的控制原理图如图4所示。

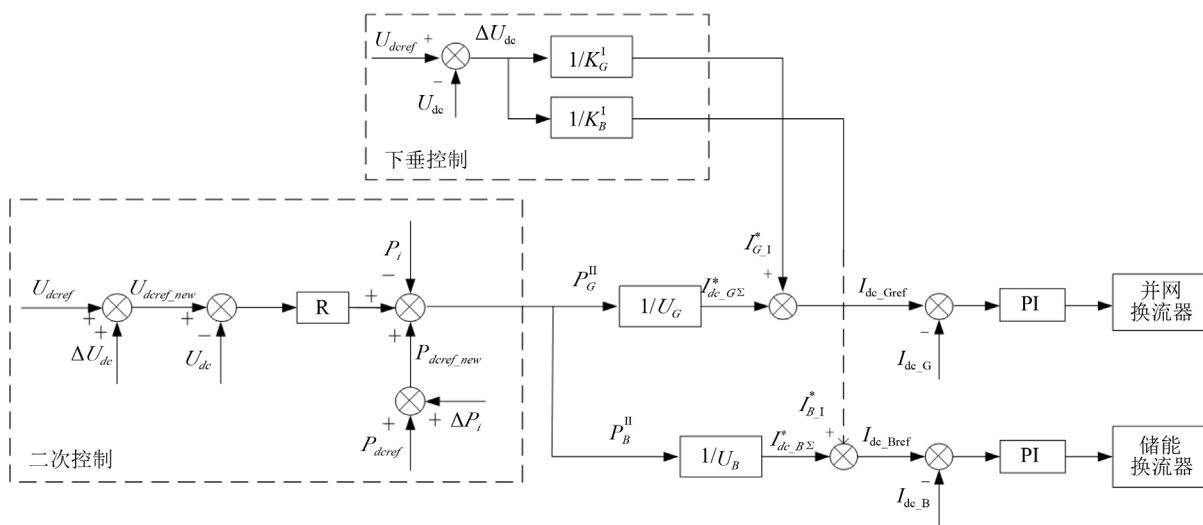


Figure 4. Bus voltage control schematic

图4. 母线电压控制原理图

5. 仿真分析

为了验证本文提出的电压偏差补偿的有效性,基于MATLAB/Simulink搭建了如图2所示的仿真模型。直流微电网中的直流电压的额定值为400 V。并网换流器的额定功率为30 kW,蓄电池的额定容量为120 Ah,储能换流器的额定功率为10 kW。为了最大限度地利用清洁能源,风光发电单元以最大功率向系统输出功率。分别考虑分布式发电和负荷波动性两种情况对母线电压的影响,分布式发电单元以光伏发电变化为例,负荷给出交直流负荷之和。仿真结果如图5所示。

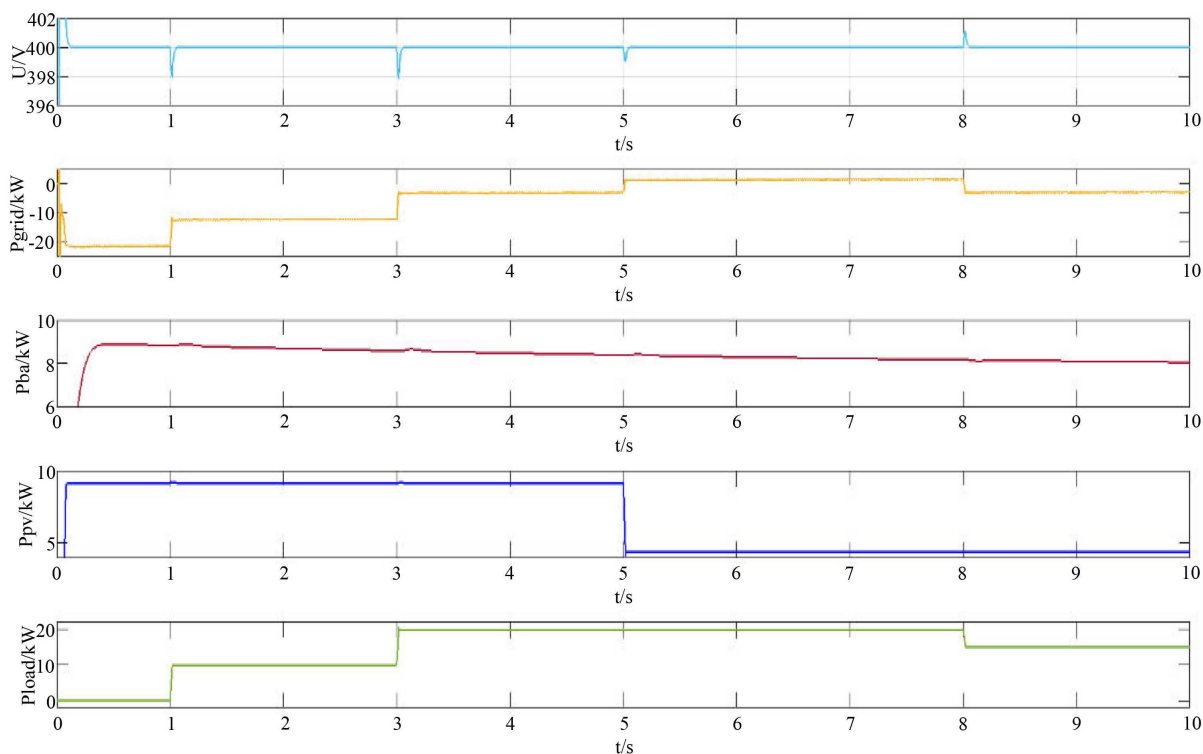


Figure 5. Simulation results

图5. 仿真结果

系统电压于0.1 s建立且进入稳态。开始时光伏发电单元出力为9 kW,风电单元出力为6.5 kW,蓄电池处于放电状态,为8.5 kW,负荷未接入,主网吸收功率约23 kW。1 s时接入10 kW负荷,系统输入功率降低引起母线电压降低,交流主网进行调压,吸收功率约13 kW。3 s时负荷增至20 kW,主网吸收功率为3 kW。5 s时光伏功率降至5 kW,蓄电池继续放电8 kW,此时主网继续调压,向直流微电网注入2 kW。8 s时负荷减少5 kW,系统输出功率降低使母线电压升高,主网吸收3 kW。由图5可以看出,当系统功率变化会引起电压的变化,由主网为主调压单元进行调压,调节功率范围均在主网调节功率范围内,对比1 s和5 s时的功率波动,可以看出系统功率波动越大,对系统电压影响越明显。采用二次控制,系统从产生电压波动到恢复额定电压的时间大约是0.1 s,并且系统电压可以稳定在额定电压400 V,没有出现电压偏差,确保系统在功率波动的情况下可以快速地调节,保证系统的稳定运行。

6. 结论

本文针对直流微电网的母线电压控制中下垂方法的局限性,采用二次控制对电压偏差进行补偿,通过补偿换流器和直流线路损耗的方式,对下垂控制的参考值进行实时更新,使调压单元的实际功率可以

接近参考值, 实现了对电压偏差的补偿, 并且缩短了电压恢复的时间, 提高了系统的稳定性和快速性。通过在 MATLAB 中搭建六端直流微电网进行仿真分析, 验证了该控制策略的有效性。

参考文献

- [1] Driesen, J. and Katiraei, F. (2008) Design for Distributed Energy Resources. *IEEE Power and Energy Magazine*, **6**, 30-40. <https://doi.org/10.1109/MPE.2008.918703>
- [2] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(12): 53-56.
- [3] Kashem, M.A., Lean, D.T., Negnevitsky, M., *et al.* (2006) Distributed Generation for Minimization of Power Losses in Distribution Systems. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, 18-22 June 2006, 1-8. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1709179>
- [4] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
- [5] 雍静, 徐欣, 曾礼强, 等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 42-52.
- [6] Guerrero, J.M., Vasquez, J.C. and Teodorescu, R. (2009) Hierarchical Control of Droop-Controlled DC and AC Microgrids: A General Approach towards Standardization. *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, Porto, 3-5 November 2009, 4305-4310.
- [7] 朱姗姗, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84 + 344.
- [8] Lu, X.N., Guerrero, J.M., Sun, K., *et al.* (2014) An Improved Droop Control Method for DC Microgrids Based on Low Bandwidth Communication with DC Bus Voltage Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy Restoration and Enhanced Current Sharing Accuracy. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**, 1800-1812. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2266419>
- [9] Wang, P.B., Lu, X.N., Yang, X., *et al.* (2016) An Improved Distributed Secondary Control Method for DC Microgrids with Enhanced Dynamic Current Sharing Performance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **31**, 6658-6673. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2499310>
- [10] 吴建国, 李成成, 张堃, 等. 直流微电网中下垂控制分析与电压补偿[J]. 控制工程, 2018, 25(5): 804-809.
- [11] 张丽荣. 风电直流微网的控制与保护技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [12] Shuai, Z.K., Fang, J.B., Ning, F.G., *et al.* (2018) Hierarchical Structure and Bus Voltage Control of DC Microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3670-3682. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.096>
- [13] 豆林林. 风储直流微电网电压控制方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [14] Akhter, F., Macpherson, D.E. and Harrison, G.P. (2014) Enhanced Multi-Terminal HVDC Grid Management for Reliable AC Network Integration. *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, Manchester, 1-5. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.0499>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: aepe@hanspub.org