

# 含分布式电源的中压柔性直流配电网研究

王珍意<sup>1</sup>, 黄文杰<sup>2</sup>, 赵川<sup>1</sup>, 陈根军<sup>3</sup>, 金朝意<sup>3</sup>, 王书征<sup>2</sup>

(1. 云南电力调度控制中心, 云南 昆明 650011; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;  
3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**直流配电技术大量减少了换流器的使用,可显著降低电网运行成本、提高系统可靠性和稳定性。在此背景下,从两端直流配电网入手,提出典型城市中压直流配电网拓扑并进行仿真分析。首先,通过探讨直流配电网相较于传统交流配电网的技术优势,分析两端直流配电网结构的可行性。然后,建立 AC/DC 变流器的功率和电压控制模型以及 DC/DC 变流器的控制模型,分析光伏和储能电池的特点,说明分布式电源直接接入直流电网减少换流器的投入,具有高效低成本的优势。最后,基于 PSCAD/EMTDC 平台对两端直流配电网系统进行建模仿真,仿真结果表明在光伏、储能以及负荷功率波动时通过有效控制能够使直流配电网稳定运行。

**关键词:**柔性直流配电网;分布式电源;功率波动;建模仿真

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.013 中图分类号:TM93 文章编号:1673-9140(2020)01-0102-07

## Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation

WANG Zhenyi<sup>1</sup>, HUANG Wenjie<sup>2</sup>, ZHAO Chuan<sup>1</sup>,  
CHEN Genjun<sup>3</sup>, JIN Zhaoyi<sup>3</sup>, WANG Shuzheng<sup>2</sup>

(1. Yunnan Electric Power Dispatching and Control Center, Kunming 650011, Yunnan Province, China;  
2. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;  
3. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** DC power distribution technology greatly reduces the use of converters. After applying this technology, the cost of power grid operation can be significantly reduced and the system reliability and stability is improved also. Under this background, a DC distribution network with both ends is considered, and a typical urban medium-voltage DC distribution network topology is proposed and simulated. Firstly, the technical advantages of the DC distribution network is explored and compared with the traditional AC distribution network. Then, the feasibility is analyzed for structure of DC distribution network with both ends. Secondly, the power and voltage control model of AC / DC converter and the control model of DC / DC converter is established. Furthermore, the characteristics of photovoltaic and energy storage batteries are analyzed. It is found that the DC distribution network can reduce the converter's investment and has the advantage of high efficiency and low cost. Finally, the DC distribution network system with both ends is modeled and simulated on the PSCAD / EMTDC platform. It is shown that stable operation of the DC distribution network is achieved by the effective control when photovoltaic, energy storage, and load power fluctuations exist.

**Key words:** flexible DC distribution network; distributed generation; power fluctuation; modeling and simulation

收稿日期:2017-05-27;修回日期:2018-06-10

基金项目:江苏省高校自然科学研究项目(16KJB470006);江苏省配电网智能技术与装备协同创新中心开放基金(XTCX201904);南京工程学院引进人才科研启动基金(YKJ201519)

通信作者:王书征(1983-),男,博士,副教授,主要从事新能源发电、柔性交直流输配电等研究;E-mail:wsz310@126.com

由于大量分布式电源的接入,现代电网面临着巨大的挑战。无论对于分布式电源的并网,还是对于直流用电设备的接入,采用传统的交流配电方式都必须经过多级变流环节,因此增加了系统的复杂程度和制造成本,提高了设备损耗。国内外学者研究表明,与交流配电相比,直流配电具有输送容量大、电能质量高等优势<sup>[1-2]</sup>。除此之外,基于直流的配电技术可以大量减少换流器的使用,降低运行成本、解决分布式电源与大电网之间的协调问题,减少“弃光”、“弃风”等现象<sup>[3-4]</sup>。

随着电网中的非线性负荷以及敏感负荷日益增多,加上越来越多的分布式电源通过电力电子设备接入其中,对于交流配电网的一些固有问题如线损大、供电走廊大,以及电压谐波含量高等电能质量问题,改变现有配电网的结构以及供电方式势在必行。

柔性直流配电网可通过优化控制,将间歇性分布式电源合理接入到交流系统中,减少了传统配网运行方式的频繁改变,从而提升了系统的可控性和可靠性。近几年,一些国家的高校或研究机构逐渐

开展了柔性直流配电技术的相关研究并提出了可行的拓扑结构和发展思路<sup>[5-7]</sup>。但研究重点主要集中在以直流微网为核心的低压直流配电方面,这些技术主要以现有的舰船直流系统为基础,而对于城市中高压直流配电系统的研究较少<sup>[8-9]</sup>。

目前,国内对直流配电网的研究尚处于初级阶段,还有待进一步研究<sup>[10-13]</sup>。两端直流配电网相较于放射状网络的供电可靠性更高,而相较于环状网络,两端直流配电网的故障识别和保护配置也相对容易,因此,该文从两端直流配电网入手,提出典型城市中压直流配电网拓扑,结构如图 1 所示。其中 VSC(voltage source converter)为电压源换流器, MVDC(medium-voltage direct current)为中压直流。此外,该文建立了 AC/DC 变流器 VSC 的功率和电压控制模型以及双有源 H 桥 DC/DC 变换器 DAB(Dual Active Bridge)的控制模型,基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,针对光伏、储能、负荷分别波动的情况,基于两端直流配电网系统平台进行了仿真分析,以验证该文提出的含分布式电源的直流配电网控制策略的可行性与有效性。

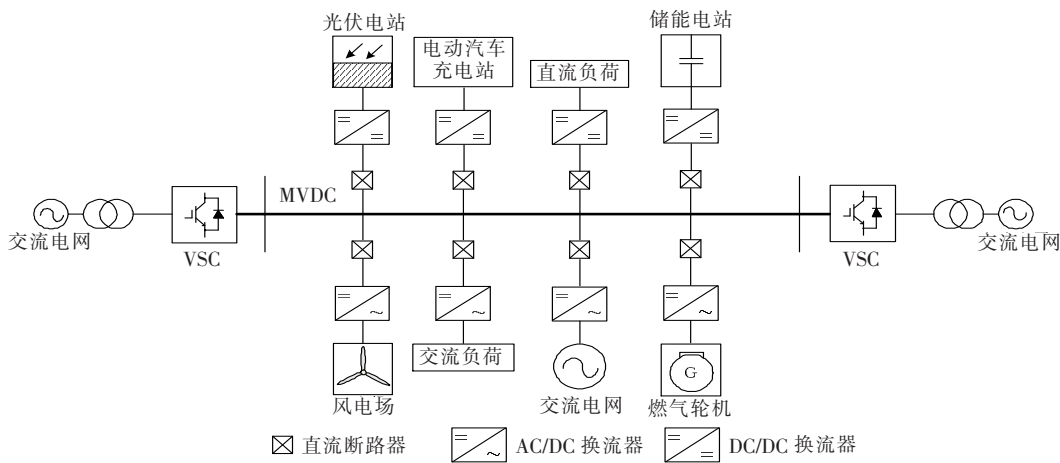


图 1 典型城市中压直流配电网拓扑

Figure 1 Topology of MVDC distribution network in typical cities

## 1 变流器模型与控制

### 1.1 并网变流器

AC/DC 变流器可以作为直流配电网的并网接口,也可以作为交流电源并入直流配电网的接口装

置。典型的 AC/DC 并网变流器拓扑如图 2 所示,由 IGBT、电容 C、滤波电感 L 等元件构成。

图 2 中,  $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  为三相交流电压;  $i_a, i_b, i_c$  为 AC/DC 变流器的三相电流;  $u_{oa}, u_{ob}, u_{oc}$  为 AC/DC 变流器的三相电压;  $U_{dc}$  为变流器直流侧电压;  $P_s$  为并网变流器的有功功率,  $Q_s$  为无功功率;  $R$  和  $L$  分别为滤波器的等效电阻和等效电感。

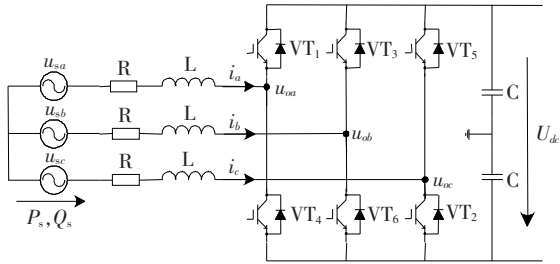


图 2 并网变流器拓扑

Figure 2 Topology of AC/DC converter

AC/DC 变流器一般采用双闭环控制,外环控制器可以实现不同的控制策略,内环控制用以精细调节达到控制目标。由于  $u_{sq} = 0$ , 可得

$$\begin{cases} u_{od} = u_{sd} - Ri_d - L \frac{di_d}{dt} + \omega Li_q \\ u_{oq} = -Ri_q - L \frac{di_q}{dt} - \omega Li_d \end{cases} \quad (1)$$

双闭环控制的 VSC 定功率控制器如图 3 所示。计算测量得到的有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$ , 分别与对应参考值  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  相比较, 输出经 PI 控制器产生  $d$ - $q$  旋转坐标系下的电流参考值  $i_{dref}$  和  $i_{qref}$ 。

除了功率控制, 还需要一个采用定直流电压控制方式的 VSC 用来平衡系统有功功率和保持直流侧电压稳定, 如图 4 所示。

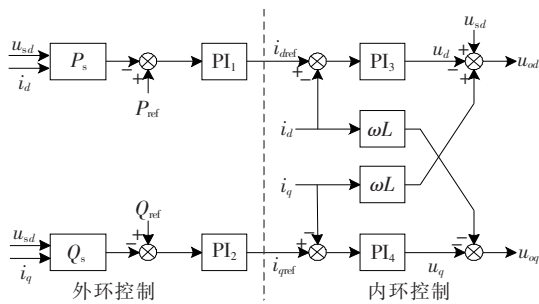


图 3 功率控制

Figure 3 Control block diagram of power

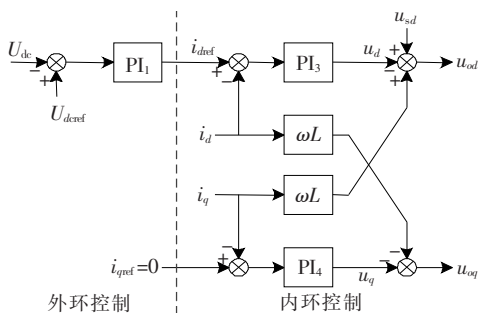


图 4 直流电压控制

Figure 4 Control block diagram of DC voltage

### 1.2 直流电源接口变流器

DC/DC 变流器可以连接直流负载或光伏电池、储能电池等分布式电源。隔离型 DC/DC 变流器可实现宽范围调压与较大容量的输出, 适合应用在较高电压等级的直流配电网系统中。该文采用如图 5 所示的基于 DAB 结构的 DC/DC 变流器拓扑。

从图 5 可以看出双有源 H 桥变流器由 2 个 H 桥外加 1 个高频变压器(应当漏感值比较大)以及两侧的直流电容 C 组成。由于两侧均采用全控型器件(IGBT), 因此可以使能量双向流动。

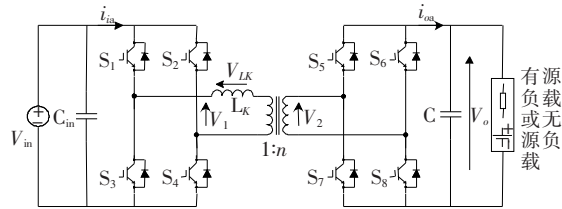


图 5 双有源 H 桥变流器拓扑结构

Figure 5 Topology of DAB converter

#### 1.2.1 DC/DC 变流器数学模型

在理想情况下, DC/DC 变流器的平均输出电流简化模型为

$$i_{oa} = \frac{(1-d)dTV_i}{L_K} \quad (2)$$

从而可以求得输入输出的关系为

$$M = \frac{V_o}{nV_i} = \frac{d(1-d)TR}{n^2L_K} = d(1-d)k \quad (3)$$

根据二次函数特性极点特性, 可以知道, 当  $d = 0.5$  时输出电压达到最大值。经过同样分析可以得出:

$$i_{ia} = \frac{Td(1-d)V_o}{nL_K} \quad (4)$$

根据式(2)、(4)可以得出系统的平均信号模型如图 6 所示。

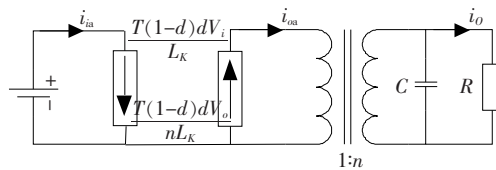


图 6 双有源 H 桥变流器平均电路模型

Figure 6 Average model of DAB converter

#### 1.2.2 DC/DC 变流器控制

理想情况下, 忽略功率开关器件的损耗以及电阻上的损耗, 则其输出功率为

$$P_o = V_o \times i_{oa} = \frac{V_1^2}{\omega L} \frac{M\varphi(\pi - |\varphi|)}{\pi} \quad (5)$$

在  $(V_o^*, \varphi_o)$  附近进行线性化处理,可以得到

$$\Delta V_o^* = A \Delta V_o + B \Delta \varphi \quad (6)$$

其中

$$A = -\frac{1}{CR_L} - \frac{8}{C\pi^2 n^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\cos[\varphi_Z(n)]}{(2n+1)^2 Z(n)} \right] \quad (7)$$

$$B = \frac{16}{C\pi^2 n} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\sin[\varphi_Z(n) - (2n+1)\varphi_o]}{(2n+1)^2 Z(n)} \right] \quad (8)$$

对应于控制器为一阶系统,其中  $T_p = -1/A$ ,  $G = -B/A$ ,通常  $\varphi_Z(n) \approx \pi/2$ ,即  $\cos[\varphi_Z(n)] \approx 0$ ,根据无穷级数特性可知  $A$  趋近于  $-1/CR_L$ , $B$  与  $\varphi_o$  有关系,且当  $\varphi_o$  比较小时, $B$  会比较大,在这里考虑 20 次谐波以内特性。系统的控制如图 7 所示。

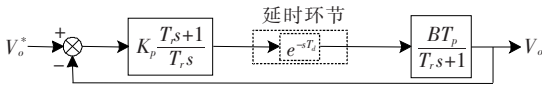


图 7 DAB 变流器控制示意

Figure 7 Control block diagram of DAB

## 2 分布式电源接入直流配电网

相较于并入交流电网,直接将光伏电池、储能电池等分布式电源并入直流配电网可以有效减少换流站等设备的投入,有效节约建设成本。

### 2.1 光伏电池接入直流配电网

光伏发电固有问题是光伏电池受温度和光照辐射强度的影响大,容易导致光伏电池的输出特性发生较大变化。因此,必须采用最大功率点跟踪(MPPT)控制策略。

该文建立的光伏发电等效电路模型如图 8 所示。图中,  $I_{PH}$  为给定光强下的短路电流;  $I_o$  为二极管饱和电流;  $R_s$  和  $R_{SH}$  为等效电阻;  $I$  为电池组件输出电流;  $U$  为电池组件终端电压。光伏电池在不同光照强度下的输出特性如图 9 所示。

光伏电池并入直流配电网如图 10 所示,只需要 DC/DC 变流器就可接入直流配电网,从而减少了换流变压器的投入,有效提高了光伏发电的效率。

### 2.2 储能装置接入直流配电网

大规模储能可以对光伏或风力发电产生的波动起到平抑的作用,也可以有效消纳可再生能源发出

的电能,从而提高其并网效率。

该文采用的储能模型为储能蓄电池与双向 DC/DC 变换器相连接,然后接入直流系统,如图 11 所示。将输出电压与电压参考值比较得到的差值经过第 1 个 PI 调节器得到电流的参考值,电流参考值与实测得到的电流比较得到的差值经过第 2 个 PI 调节器得到 PWM 调制信号,然后与载波比较生成开关  $S_1$  和  $S_2$  的触发脉冲。

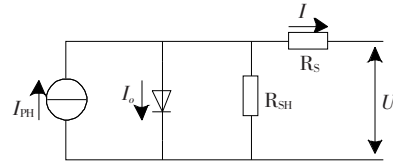


图 8 光伏发电的等效电路

Figure 8 Equivalent circuit of photovoltaic generation

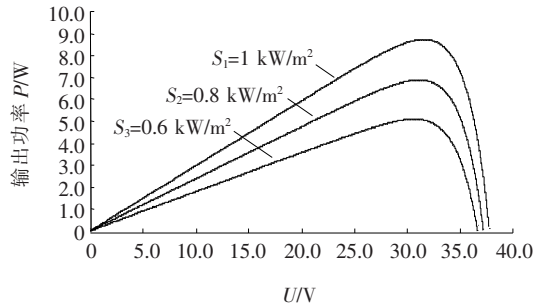


图 9 光伏电池输出特性曲线

Figure 9 Output characteristic curves of photovoltaic cells

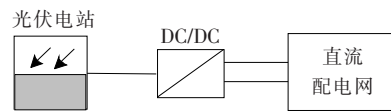


图 10 光伏接入直流配电网简化示意

Figure 10 Photovoltaic power generation access to DC distribution network

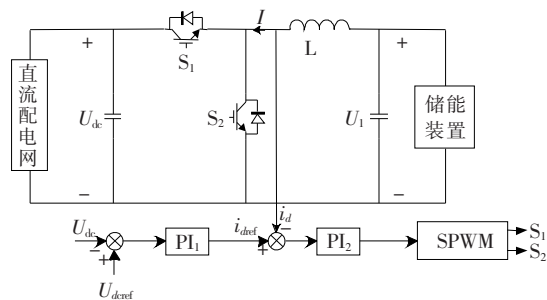


图 11 储能接入直流配电网模型

Figure 11 Model of energy storage access to DC distribution network

### 3 系统仿真与分析

该文基于两端直流配电网拓扑构建的仿真模型如图 12 所示。图中,直流配电网电压等级为 10 kV;低压负荷的电压等级为 0.4 kV;VSC 交流侧电压为 6.6 kV;VSC1、VSC2 分别采用功率和定电压控制;DC/DC 为双向变流器,其中低压负荷采用图 5 所示的 DAB 连接至直流配电网,储能系统和光伏电池通过图 10 所示的双向 DC/DC 连接至直流配电网。

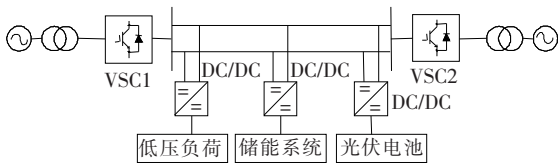


图 12 柔性直流配电网仿真系统  
Figure 12 Simulation system of flexible DC distribution network

#### 3.1 系统稳态仿真分析

设置光伏输出功率为 1.5 MW,储能系统输出功率为 2 MW,这个直流配电网的稳态特性如图 13 所示。仿真结果表明,在光伏电池和储能系统同时向直流配电网输入功率时,整个系统能够保证稳定运行。

#### 3.2 系统静态稳定性仿真分析

1) 光伏输出的扰动。

为了测试分布式电源输入功率以及负载变化对直流配电网的影响,考虑不同动态情况下直流配电网的动态响应特性,首先以光伏为例,设置光伏电池的输出功率在  $t = 4\text{ s}$  时从 1.5 MW 阶跃下降至 0.35 MW;在  $t = 6\text{ s}$  时,光伏电池的输出功率从 0.35 MW 阶跃至 2.3 MW。

10 kV 直流线路测量电压和光伏输出功率变化如图 14 所示,光伏输出功率下降时,直流线路电压基本保持在额定值;光伏输出功率突增时,直流线路的电压有一个短时间的小幅上升,波动为 0.23%,并且在波动发生后 0.3 s 内直流电路电压恢复成额定值。说明此系统在光伏输出功率大幅波动的情况下,能够保证直流电压的稳定,满足负荷用电需求的同时保证了较高的电能质量。

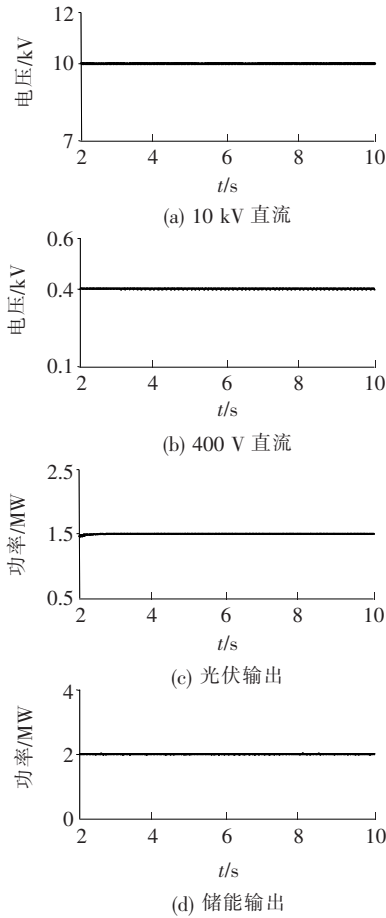


图 13 直流配电网稳态特性

Figure 13 Steady state characteristics of DC distribution network

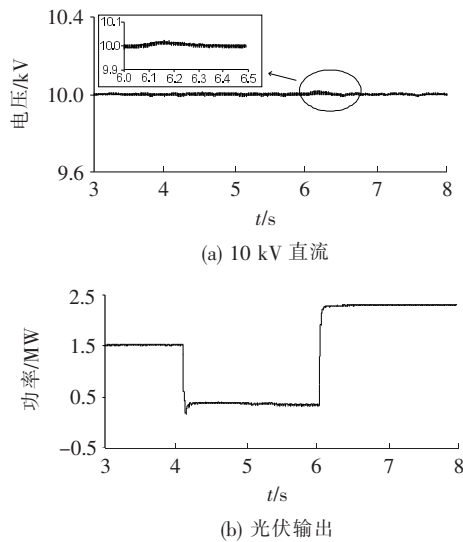


图 14 光伏输出波动对直流电压的影响

Figure 14 Influence of photovoltaic output fluctuation on DC voltage

2) 储能系统的充放电扰动。

储能系统在直流配电网中扮演削峰填谷的作

用,有充电和放电 2 种状态。设置储能为放电状态,对直流配电网输入功率 2 MW;在  $t=5\text{ s}$  时,设置储能系统进入充电状态,充电功率为 1 MW。

10 kV 直流线路测量电压和储能系统功率变化如图 15 所示,储能系统输出功率由 2 MW 变化为  $-1\text{ MW}$  时,直流线路电压出现小幅下降,波动为 3.3%,并且在波动发生后 0.2 s 内直流线路电压恢复至额定值。说明此系统在储能系统从放电状态进入至充电状态情况下,能够保证直流电压的稳定,满足负荷用电的同时能够给储能系统有效充电,保证了直流配电网的灵活性。

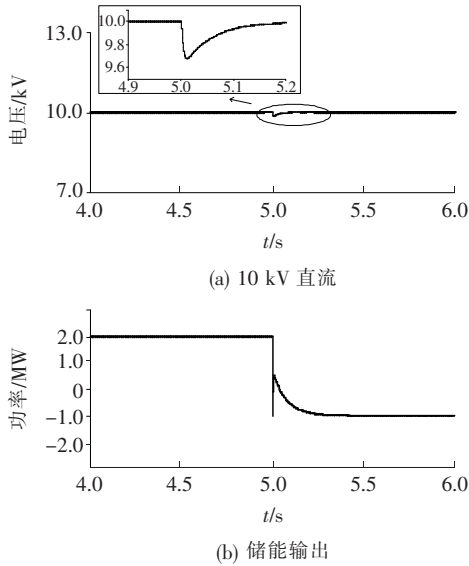


图 15 储能系统输出波动对直流电压的影响  
Figure 15 Influence of output fluctuation on DC voltage of energy storage system

3) 低压负荷的扰动。

低压负荷通过双向 DC/DC 变流器连接至中压直流配电网。设置低压负荷功率在  $t=5\text{ s}$  时,功率从 30 kW 增加至 60 kW。

10 kV 直流线路测量电压和低压负荷功率变化如图 16 所示,在低压负荷增加时,直流电压出现小幅下降,波动为 1.9%,并且在波动发生后 0.1 s 时恢复至额定值。说明此系统在低压负荷增加时,能够保证直流电压的稳定,双向 DC/DC 变流器也有较好的调节能力和响应速度,保证了低压负荷的可靠供电。

仿真结果证明:当中压直流配电网中分布式电源输入功率发生变化,或者低压负荷发生变化时,该文提出的直流配电网的控制策略,能够快速调节

直流线路电压,使整个直流配电网更加有效稳定的运行。

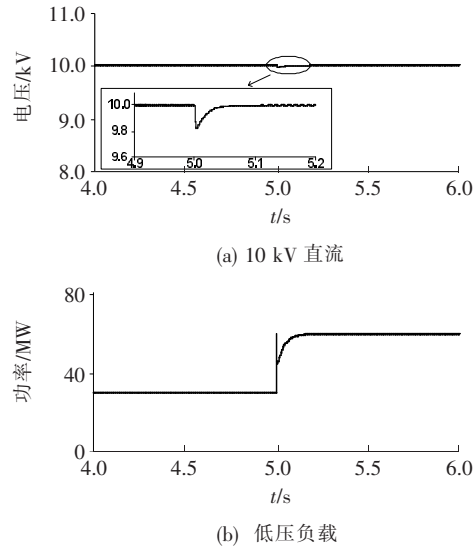


图 16 低压负荷波动对直流电压的影响  
Figure 16 Influence of low voltage load fluctuation on DC voltage

4 结语

1) 相较于交流电网,直流配电网在光伏、储能等分布式电源接入时具有多种优势,在充分利用分布式电源的同时具有良好的经济效益,提高了电能质量。

2) 建立了 AC/DC 和双向 DC/DC 变流器的控制模型。建立了光伏电池的等效模型,设计了光伏和储能电池接入直流配电网的接口结构。相较于交流配电网,接入直流配电网可以减少变流设备的投入。

3) 基于 PSCAD/EMTDC 平台在光伏、储能电池功率变化、负荷功率波动时对两端直流配电网模型进行仿真分析,结果表明在正常情况下直流配电网能够稳定运行。在分布式电源输出功率发生波动以及低压负荷发生波动时,所采用的控制策略能够维持直流线路电压的稳定,整个直流配电系统能够稳定运行。

参考文献:

[1] Hammerstrom D J. AC versus DC distribution systems did we get it right[C]//2007 IEEE Power Engineering

- Society General Meeting. Tampa, FL, USA; IEEE, 2007.
- [2] Dastgeer F, Kalam A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]//2009 Australasian Universities Power Engineering Conference. Adelaide, SA, Australia; IEEE, 2009.
- [3] 李勇, 梁爽, 陈曦, 等. 直流配电网中的线路保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 136-144.  
LI Yong, LIANG Shuang, CHEN Xi, et al. Line protection scheme for DC distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 136-144.
- [4] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106+113.  
Wu Weimin, He Yuanbin, Geng pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106+113.
- [5] Brenna M, Tironi E, Ubezio G. Proposal of a local DC distribution network with distributed energy resources [C]//2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No. 04EX951). Lake Placid, NY, USA; IEEE, 2004.
- [6] Boroyevich D, Cvetković I, DONG Dong, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Basov, Romania; IEEE, 2010.
- [7] Kakigano H, Miura Y, Ise T, et al. DC micro-grid for super high quality distribution-system configuration and control of distributed generations and energy storage devices[C]//Power Electronics Specialists Conference, Jeju, South Korea; IEEE, 2006.
- [8] 于立杰, 董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 72-78.  
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network [J]. Smart Power, 2018, 46(9): 72-78.
- [9] 赵彪, 赵宇明, 王一振, 等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4843-4851.  
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, et al. Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4843-4851.
- [10] 胡子珩, 马骏超, 曾嘉思, 等. 柔性直流配电网在深圳电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 44-47.  
HU Ziheng, MA Junchao, ZENG Jiasi, et al. Research on application of flexible DC power distribution system in shenzhen power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6): 44-47.
- [11] 高倩, 朱佳明, 林其友, 等. 考虑孤岛供需波动的多DG配电系统可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 136-142.  
GAO Qian, ZHU Jiaming, LIN Qiyong, et al. Reliability evaluation of multi DG distribution system considering islanding fluctuation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 136-142.
- [12] 李琼林, 刘书铭, 谭甜源, 等. 等值电阻法计算配网损耗的误差量化分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 156-165.  
LI Qionglin, LIU Shuming, TAN Tianyuan, et al. Error analysis of equivalent resistance method for distribution theoretical line-loss[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 156-165.
- [13] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403.  
SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403.