

DOI: 10.7667/PSPC161002

直流微电网电压等级的选择及其稳定控制策略研究

田龙刚

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司华东分公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 针对直流微电网电压等级的选择与确定, 在已有直流标准和直流工程电压等级基础上, 考虑微电网容量和供电半径, 进行运行损耗计算, 从而选择最优的直流母线电压等级。针对直流微电网电压稳定控制, 并网运行时采用储能 DC/DC 变流器控制直流母线电压稳定, AC/DC 逆变器控制直流微电网并网功率。孤岛运行时采用储能 DC/DC 变流器控制直流母线电压稳定。在 PSCAD/EMTDC 中搭建直流微电网仿真模型, 进行不同运行模式下的电压稳定控制策略仿真验证。结果表明, 所采用的电压稳定控制策略, 在光伏发电功率和负荷功率波动的情况下, 能很好地控制直流微电网电压稳定。

关键词: 直流微电网; 电压等级; 电压稳定控制

Research on the voltage level selection and its stability control strategy of DC microgrid

TIAN Longgang

(Eastern China Branch, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Hefei 230088, China)

Abstract: In order to select and determine the DC microgrid voltage level, on the basis of the voltage level for existed DC standards and DC projects, considering the capacity and power supply radius of the microgrid, this paper calculates run loss of the DC microgrid to select the optimal voltage level of the DC bus. For the voltage stability control of DC microgrid, in grid-connected operation, the battery DC/DC converter is used to control the voltage stability of DC bus, and the AC/DC converter is used to control the grid power of DC microgrid. In islanded operation, the battery DC/DC converter is used to control the voltage stability of DC bus, too. The simulation model of DC microgrid in PSCAD/EMTDC is established to verify the voltage stability control strategy on different operation modes. The results show that the control strategy can control DC microgrid voltage stability in the case of PV power and load power fluctuations.

This work is supported by Key Special Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key R & D Plan (No. 2016YFB0900601).

Key words: DC microgrid; voltage level; voltage stability control

0 引言

随着全球能源战略转向可再生能源, 分布式发电与微电网技术得到了各国的广泛关注和大力发展。目前, 微电网技术仍然是提高可再生能源发电可控性与灵活性的最有效途径^[1]。交流微电网作为配电网的一种补充和完善, 已取得了很多的研究和应用成果, 也暴露出了很多问题, 比如因系统频率稳定及各微源之间的环流问题而增加的控制难度。

同时, 随着信息社会的发展, 越来越多的直流负荷直接应用到生产生活中, 如电动汽车、直流家电、电子信息产品等。而很多分布式电源如光伏电池、蓄电池储能、燃料电池等也直接产生直流电。这些微电源或者直流负荷接入到配电网或者交流微电网当中, 将要经过 AC/DC 变换器, 势必降低了效率, 增加了控制难度^[2-3]。

直流微电网可以直接接入大部分微电源和直流负荷, 提高了系统效率, 且直流微电网系统的控制目标只有电压稳定, 无需考虑频率、相位和无功, 降低了其控制难度。基于此, 直流微电网得到了迅速的研究和发展。文献[4-5]针对直流配电网和直流

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项 (2016YFB0900601)

微电网在国内的发展前景进行了综述性研究,并指出了未来直流系统研究和建设的一些方向。文献[6]详细分析了不同结构直流微电网的运行模式、结构特性及应用场景,为直流微电网的建设提供了一定的参考。文献[7]针对低压直流配电系统分析比较了电压源换流器不同接地方式的优缺点,并进行了仿真验证,对未来直流配电网和直流微电网的保护方案配置奠定了基础。文献[8]研究了不同运行方式和不同工作模式下直流微电网的控制策略,并提出了锂电池自适应调节下垂系数的控制策略,不仅实现了直流微电网的稳定运行,还延长了电池的使用寿命。文献[9]为解决微电源出力波动引起系统功率失衡的问题提出了直流微电网电压分层控制,简化了控制系统结构,提高了控制的灵活性。

不同于交流系统,直流微电网的稳定运行和电能质量控制唯一的目标就是其电压的稳定控制。因此直流微电网电压等级的选择和电压的稳定控制非常重要。

本文在已有直流标准和直流工程电压等级基础上,考虑直流微电网容量和供电半径,进行直流微电网运行线损率的计算,进而选取最优的直流母线电压等级。针对直流微电网不同的运行模式,本文设计了相适应的电压稳定控制策略。在此基础上,在 PSCAD/EMTDC 中搭建直流微电网仿真模型,并进行了电压稳定控制策略的仿真验证。结果表明,在光伏发电功率和负荷功率波动的情况下,所采用的控制策略能很好地控制直流母线电压稳定,实现直流微电网的稳定运行。

1 直流微电网电压等级的选择

目前国内外直流微电网的电压等级还未形成标准,在直流微电网的设计和建设当中,直流母线电压的选取一般从两方面出发,一是参考已有的直流系统电压等级标准和直流工程,二是考虑微电网容量、供电半径、直流设备、运行损耗等因素来确定^[10]。

1.1 已有直流系统电压等级标准和直流工程

(1) DC380 V

日本于 2009 年提出的基于数据中心直流配电的 DC380V 标准^[11],得到了全世界电力行业的认可,此外,日本 NTT 集团已开发出 DC380 V 直流供电系统和 DC400 V 的电源插头^[5]。

(2) DC48 V

DC48 V 标准^[10]广泛用于各国的电信设备,该标准的形成主要是为了兼容早期电话机的供电网络。目前,DC48 V 直流微电网广泛应用于偏远地区通信基站的供电系统。

(3) 美国电力研究协会对世界上一些国家的主要直流供电工程的电压等级进行了统计,如表 1 所示。

表 1 各国直流工程电压等级

国家	美国	法国	瑞典	日本	新西兰
电压/V	380/550	350	350/380	300/350/380	220

1.2 直流微电网运行线损率计算

直流微电网电压等级的确定不仅需要参考已有标准和工程,还需要考虑微电网容量、供电半径、直流设备电压等级、运行损耗等因素。本文重点考虑运行线损率,以微电网容量和供电半径为约束条件,进行运行线损率的计算来选取最优电压等级。直流微电网运行时,运行损耗可用直流母线线损率^[12]来表征,如式(1)所示。

$$\delta\% = \frac{2(P_d/2U_d)^2 rL}{P_d} \times 100\% \quad (1)$$

其中直流微电网传输功率及供电半径需满足的约束条件^[13]如式(2)和式(3)所示。

$$P_{\max} \geq \frac{0.05S \times U_d^2}{2\rho L} = \frac{0.05U_d^2}{2r} \quad (2)$$

$$L \leq \frac{\Delta U\% \times U_d^2}{2rP_d} \quad (3)$$

式中: $\Delta U\%$ 为直流子系统允许的电压偏差; P_{\max} 为直流子系统最大传输功率; P_d 为直流子系统额定传输功率; U_d 为直流子系统电压; r 为导线单位长度电阻; L 为直流微电网供电距离; S 为导线截面积; ρ 为导线电导率。

针对直流工程中常见的 DC200 V、DC380 V 和 DC550 V 进行线损率计算。假设微电网的传输功率 $P_d=50$ kW, 线路电阻 $r=0.06 \Omega/\text{km}$, 利用式(3)分别计算直流微电网三种电压等级下的最大供电距离:

$$L_{200} \leq \frac{7\% \times 200^2}{2 \times 0.06 \times 50} = 0.47 \text{ km}$$

$$L_{380} \leq \frac{7\% \times 380^2}{2 \times 0.06 \times 50} = 1.68 \text{ km}$$

$$L_{550} \leq \frac{7\% \times 550^2}{2 \times 0.06 \times 50} = 3.53 \text{ km}$$

然后利用式(2)计算直流微电网三种电压等级下的最大传输功率:

$$P_{200\max} \geq \frac{0.05S \times U_d^2}{2\rho L} = \frac{0.05 \times 200^2}{2 \times 0.06} = 16.67 \text{ kW}$$

$$P_{380\max} \geq \frac{0.05S \times U_d^2}{2\rho L} = \frac{0.05 \times 380^2}{2 \times 0.06} = 60.17 \text{ kW}$$

$$P_{550\max} \geq \frac{0.05S \times U_d^2}{2\rho L} = \frac{0.05 \times 550^2}{2 \times 0.06} = 126.04 \text{ kW}$$

最后利用式(1)计算直流微电网三种电压等级下的线损率, 如表 2 所示。其中供电距离取该电压等级下的最大距离:

$$\delta_{200}\% = \frac{2(P_d/2U_d)^2 rL}{P_d} \times 100\% = 17.63\%$$

$$\delta_{380}\% = \frac{2(P_d/2U_d)^2 rL}{P_d} \times 100\% = 17.45\%$$

$$\delta_{550}\% = \frac{2(P_d/2U_d)^2 rL}{P_d} \times 100\% = 17.50\%$$

表 2 不同电压等级下的运行线损率

Table 2 Operation line loss under different voltage levels

电压等级/V	DC200	DC380	DC550
线损率 $\delta\%$	17.63%	17.45%	17.50

由结果可知, 在直流微电网容量为 50 kW 时, DC380 V 的线损率最低。且由计算结果可知, DC200 V 和 DC550 V 所计算出来的最大传输功率 P_{\max} 和计算之前所假设的直流微电网传输功率 P_d 相差甚远, DC200V 的最大传输功率过于小, 而 DC550 V 的最大传输功率过于大, 均不适用于事先假定的微电网容量。因此, 在直流微电网传输功率不大于 50 kW 时, 直流电压等级选择 DC380 V。若传输容量大于 50 kW, 则直流电压等级需另行计算。

2 直流微电网电压稳定控制策略研究

直流微电网的电压稳定控制, 对于整个系统的稳定运行有着重要的作用。直流母线连接着分布式电源、储能装置和逆变器, 如图 1 所示, 因此, 直流母线电压的稳定控制就要依靠三者的协调工作。

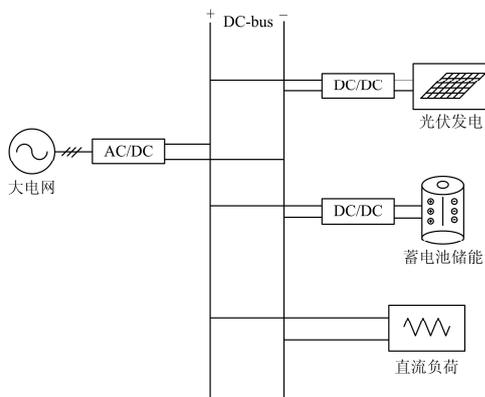


图 1 直流微电网结构图

Fig. 1 Structure of DC microgrid

在直流微电网并网运行时, 直流母线电压可以采用 AC/DC 逆变器来控制, 也可以采用储能 DC/DC 变换器来控制^[3]。当直流母线电压采用 AC/DC 逆变器来控制时, AC/DC 逆变器需采用 U/Q 控制策略, 即控制直流母线电压稳定和并网无功功率, 这样一来, 直流微电网的并网有功功率无法控制。当直流母线电压采用储能 DC/DC 变换器来控制时, AC/DC 逆变器则可采用 P/Q 控制策略, 如此一来, 并网运行时, 直流微电网的电压稳定和并网功率均可以有效控制。而直流微电网孤岛运行时, 直流母线电压就只能通过蓄电池 DC/DC 变换器来控制。直流微电网不同运行模式下, 电压控制结构图分别如下所示。

(1) 孤岛模式下, 采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定, 控制结构如图 2 所示。

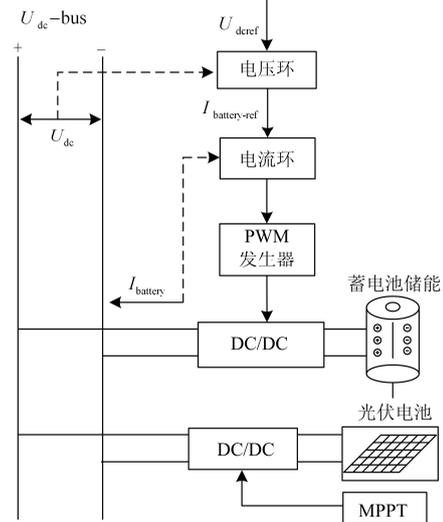


图 2 孤岛模式电压控制结构图

Fig. 2 Structure of voltage control in islanded operation

(2) 并网模式下, 采用 AC/DC 逆变器控制直流母线电压稳定, 此时, AC/DC 逆变器采用 U/Q 控制策略, 控制结构如图 3 所示。

(3) 并网模式下, 采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定, AC/DC 逆变器控制并网功率, 控制结构如图 4 所示。

在直流微电网孤岛运行时, 采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压, 控制策略如图 5 所示。

在直流微电网并网运行时, 为了更好地控制直流微电网的并网功率, 工程上一般采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压, AC/DC 逆变器控制并网功率的控制策略, AC/DC 逆变器的 P/Q 控制策略如图 6 所示。

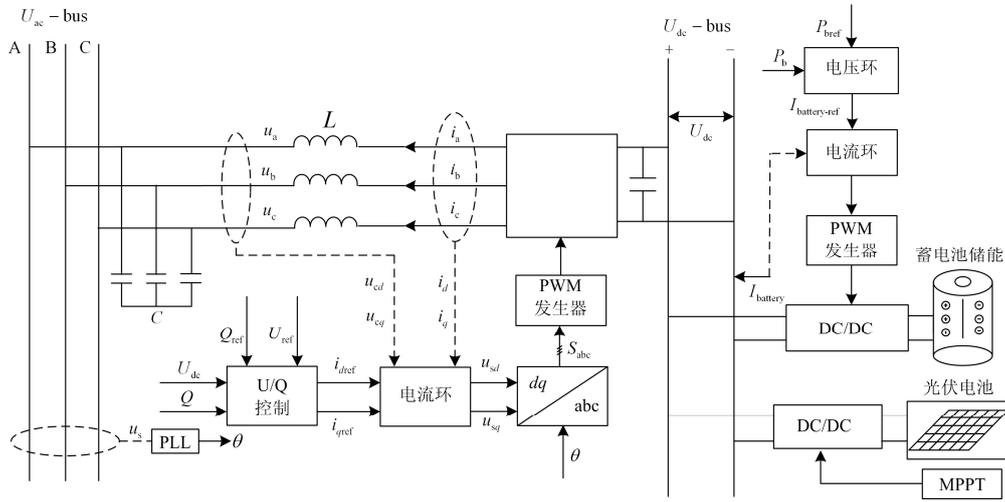


图 3 并网模式下电压控制结构图 I

Fig. 3 Structure I of voltage control in grid-connection operation

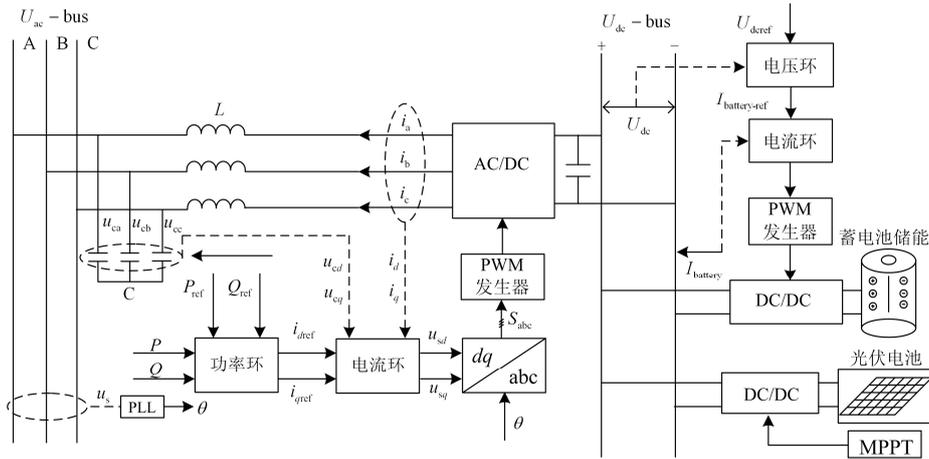


图 4 并网模式下电压控制结构图 II

Fig. 4 Structure II of voltage control in grid-connection operation

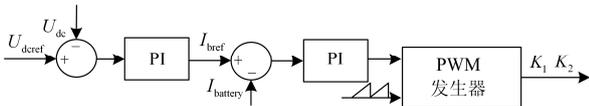


图 5 孤岛模式下电压稳定控制策略

Fig. 5 Control strategy of voltage in islanded operation

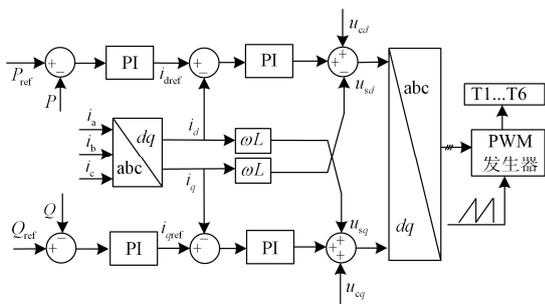


图 6 并网模式下电压稳定控制策略

Fig. 6 Control strategy of voltage in grid-connection operation

3 算例仿真

在 PSCAD/EMTDC 中搭建直流微电网，如图 7 所示，具体的仿真参数如表 3 所示。对前文所述的电压稳定控制策略进行仿真验证。

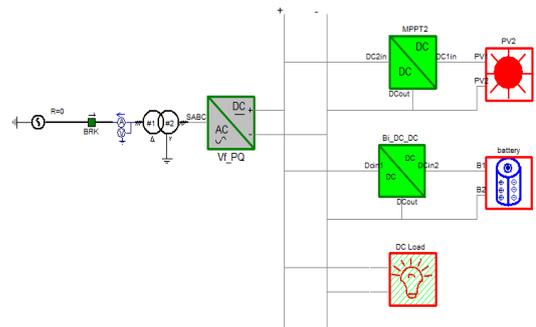


图 7 直流微电网仿真模型

Fig. 7 Simulation model of DC microgrid

表 3 直流微电网仿真参数表

Table 3 Simulation parameters of DC microgrid

仿真参数/单位	数值
直流母线电压/V	380
光伏阵列最大电压/V	250
光伏阵列最大电流/A	41.25
重要负荷/kW	3
次要负荷/kW	2
蓄电池容量/Ah	600
蓄电池额定电压/V	150
蓄电池初始 SOC	80%
蓄电池充放电限制 SOC	95%/35%
直流微电网并网功率(有功)/kW	5
直流微电网并网功率(无功)/kvar	0

仿真时长 10 s, 期间光伏发电温度和光照变化曲线如图 8 所示。光伏功率波动和负荷功率波动如图 9 所示。

直流微电网孤岛运行时, 储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定, 光伏发电功率和负荷功率波动由蓄电池储能进行平抑。孤岛模式下, 直流微电网电压稳定控制仿真结果如图 10 所示, 蓄电池平抑功率波动, 充放电 SOC 如图 11 所示。

由仿真结果可知, 当光伏发电功率或者负荷功率波动时, 储能 DC/DC 变换器能很好地控制直流母线电压稳定, 波动功率由蓄电池进行平抑。

直流微电网并网运行时, 储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定, 光伏发电功率和负荷功率波动由蓄电池储能进行平抑。AC/DC 逆变器控制直流微电网的并网功率, 设置并网有功功率参考值为 5 kW, 并网无功功率参考值为 0 kvar。并网模式下, 直流微电网电压稳定控制仿真结果如图 12 所示, 并网功率波形如图 13 所示, 蓄电池平抑功率波动, 充放电 SOC 如图 14 所示。

由仿真结果可知, AC/DC 逆变器控制直流微电网并网功率恒定, 储能 DC/DC 变换器能很好地控制直流母线电压稳定, 波动功率由蓄电池进行平抑。

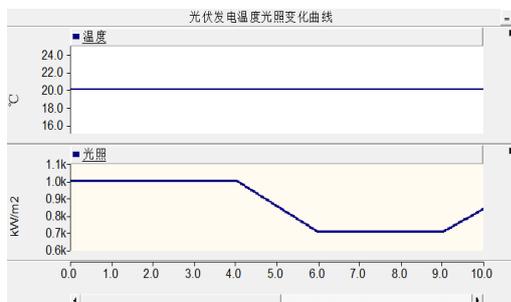


图 8 光伏发电温度和光照变化曲线

Fig. 8 Temperature and light curve of PV

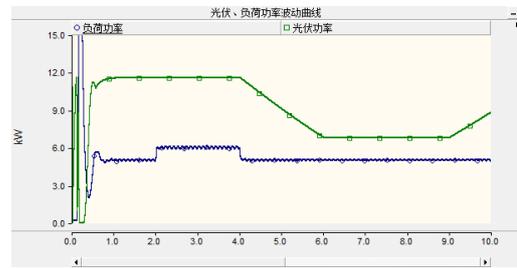


图 9 光伏发电功率和负荷功率波动曲线

Fig. 9 Power fluctuation curve of PV and load

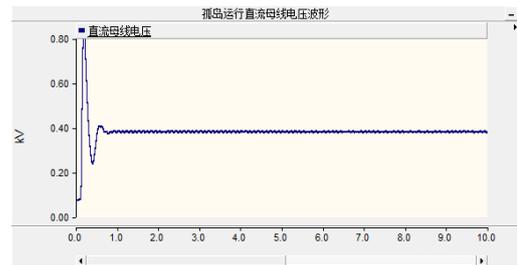


图 10 孤岛模式下直流母线电压

Fig. 10 Voltage of DC microgrid in islanded operation

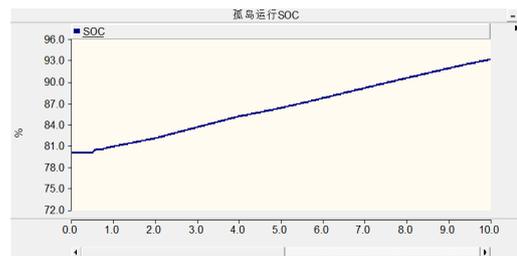


图 11 孤岛模式下蓄电池 SOC

Fig. 11 SOC of battery in islanded operation

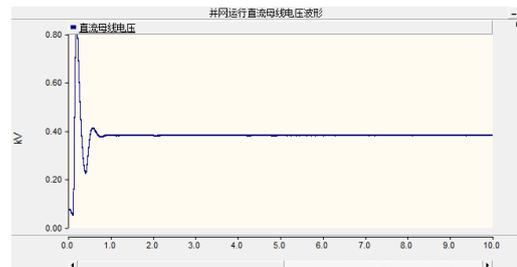


图 12 并网模式下直流母线电压

Fig. 12 Voltage of DC microgrid in grid-connection operation

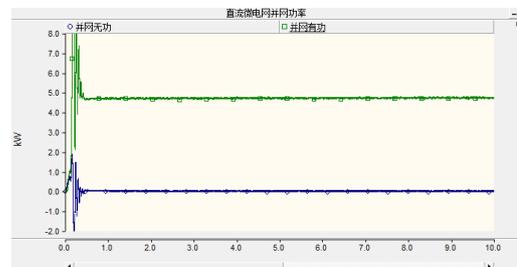


图 13 并网模式下直流微电网并网功率

Fig. 13 Grid power of DC microgrid in grid-connection operation



图 14 并网模式下蓄电池 SOC

Fig. 14 SOC of battery in grid-connection operation

4 结论

(1) 直流微电网电压等级确定时,除了要参考已有直流标准和直流工程的电压等级外,还需要进行考虑微电网容量和供电距离的运行损耗计算,从而确定最优的直流微电网电压等级。

(2) 直流微电网孤岛运行时,采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定。直流微电网并网运行时,不宜采用 AC/DC 逆变器控制直流母线电压稳定,应采用储能 DC/DC 变换器控制直流母线电压稳定,且 AC/DC 逆变器控制直流微电网并网功率的稳定。由仿真结果可知,该控制策略能够有效地控制直流微电网的电压稳定,且能够实现直流微电网并网功率的可控,具有较好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 刘舒,李正力,王翼,等.含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [2] 周逢权,黄伟.直流配电网系统关键技术探讨[J].电力系统保护与控制,2014,42(22):62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.
- [3] 丁明,田龙刚,潘浩,等.交直流混合微电网运行控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [4] 温家良,吴锐,彭畅,等.直流电网在中国的应用前景分析[J].中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [5] 王晓虹,艾芊.直流微电网在配电系统中的研究现状与前景[J].低压电器,2012(5):1-7.
WANG Xiaohong, AI Qian. Present research situation and application prospects of power distribution system with DC micro-grid[J]. Low Voltage Apparatus, 2012(5): 1-7.
- [6] 黄文焘,邵能灵,范春菊,等.微电网结构特性分析与设计[J].电力系统保护与控制,2012,40(18):149-155.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [7] 鲁国正,高亮,梁智敏.电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J].电力系统保护与控制,2016,44(12):75-80.
LU Guoheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 75-80.
- [8] 刘家赢,韩肖清,王磊,等.直流微电网运行控制策略[J].电网技术,2014,38(9):2356-2362.
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2362.
- [9] 王毅,张丽荣,李和明,等.风电直流微电网的电压分层协调控制[J].中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
WANG Yi, ZHANG Rongli, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [10] 周金辉,葛晓慧.直流微电网供电模式研究初探[J].浙江电力,2013,32(4):6-9.
ZHOU Jinhui, GE Xiaohui. Preliminary study on power supply mode for DC microgrid[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 32(4): 6-9.
- [11] GUY A. DC-an idea whose time has come and gone? [EB/OL] // <http://blogs.intel.com/research/2010/05/dc-an-idea-whose-time-has-co.php>, 2010.
- [12] 蔡瀛淼.直流配电电压等级影响因素与评价指标研究[D].北京:华北电力大学,2014.
CAI Yingmiao. Research on influencing factors and evaluation indexes of DC distribution voltage grade[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [13] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 3(5): 1499-1507.

收稿日期: 2016-07-04; 修回日期: 2016-11-03

作者简介:

田龙刚(1988—),男,助理工程师,研究方向为新能源与分布式发电技术。E-mail: 13665604397@163.com

(编辑 葛艳娜)