

DOI: 10.7667/PSPC160216

单端量行波保护在中压柔性直流配电网的适应性分析

陈福锋^{1,2}, 杨阳^{3,4}, 宋国兵³, 王玉婷^{1,2}, 褚旭³, 罗娟³, 刘珮瑶³

(1. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032; 2. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153;
3. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049; 4. 国网苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 为了研究单端量行波保护原理在中压柔性直流配电网的适应性, 首先通过对单端量行波保护的原理分析, 得出其最佳应用条件。结合柔性直流配电线路的故障特征进行理论分析, 从而得到行波保护在直流配电网中适应性的一般结论; 然后搭建中压柔性直流配电网的电磁暂态模型并进行仿真, 并与通过理论分析得到的结论进行了比较分析。研究表明, 单端量行波保护能够适用于中压柔性直流配电线路的保护, 且动作性能良好。仿真结果验证了理论分析的正确性。

关键词: 直流配电; 柔性直流; 行波保护; 故障特征; 适应性分析

Adaptability analysis of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC

CHEN Fufeng^{1,2}, YANG Yang^{3,4}, SONG Guobing³, WANG Yuting^{1,2}, CHU Xu³, LUO Juan³, LIU Peiyao³

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China; 2. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211153, China; 3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
4. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: For studying the adaptability of single terminal traveling wave protection in mid-voltage DC distribution based on VSC (voltage sourced converter), firstly the best working condition is obtained by analyzing the principle of single terminal traveling wave protection, the general protection adaptability conclusion is reached by theoretical analysis based on the condition and the fault characteristics of DC distribution lines. Then, the electrical-magnetic model of DC distribution network is established and simulated, and the simulation results are compared with theoretical analysis results. The research shows that the single-terminal traveling wave protection can apply to VSC-based mid-voltage DC distribution line with good performance. The correctness of theoretical analysis is verified by simulation results.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477131).

Key words: DC distribution; VSC; traveling wave protection; fault characteristics; adaptability analysis

0 引言

随着清洁能源开发技术的突破, 经济性大幅提升, 以清洁能源替代化石能源将成为全球能源发展的重要趋势, 推动了光伏、风机等分布式电源以及蓄电池等储能电源在配电网中的应用^[1-2]; 另外, 直流电力负荷的急剧增长使得传统交流配电网面临巨大的挑战, 而直流配电网能够改善用户侧的电能质量, 减小线路损耗, 提高供电的可靠性和经济性^[3-9], 直流配电网具有广阔的应用前景。

继电保护是直流配电网发展进程中的关键技术之一。直流配电网的配电方式以直流作为主导, 其故障特征区别于交流配电网, 并且暂时没有具体的工程应用实例, 缺乏运行经验, 因此, 直流配电网的继电保护技术是目前国内外学者研究的重点。

与基于工频电气量的传统交流保护相比, 行波保护具有快速动作性能, 此外, 行波保护还有不受过渡电阻、系统震荡和分布电容等影响的独特优点, 广泛应用于高压直流输电线路保护^[10]。研究配电网直流化的条件下, 行波保护的适用性对于保证配电网安全可靠运行具有重要的作用。

目前, 国内外学者对于直流配电网的研究仍处

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51477131)

于起步阶段, 针对行波保护在中压柔性直流电网适应性的研究更是寥寥无几。鉴于此, 本文首先通过探究行波保护的基本原理得出最佳应用条件, 结合直流电网的故障特征从理论上对其适应性进行分析, 得到行波保护适应性的一般结论。最后, 电磁暂态程序仿真结果验证了适应性分析的正确性。

1 行波保护的适用条件

单端量行波保护的基本思想是通过初始反行波波头陡度的差异从而判别故障是否发生在区内。下图 1 为行波保护原理的示意图。

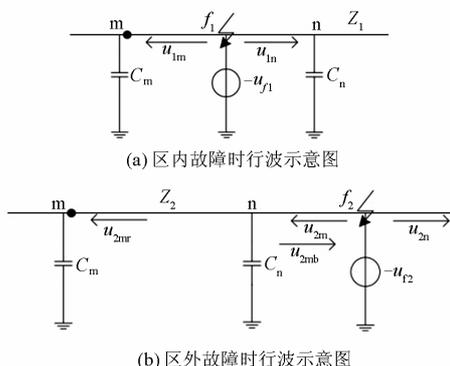


图 1 单端量行波保护原理示意图

Fig. 1 Schematic of single terminal traveling wave protection

图 1 中, m 和 n 分别表示区内线路的两端, 本端 m 端装设电压测量元件, C_m 和 C_n 为边界电容, Z_1 为正向区外系统波阻抗, Z_2 为区内线路波阻抗。如图 1(a)所示, 当区内点 f_1 处发生故障后, 相当于在故障点 f_1 处加一与该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的电压 $-u_{f1}$ 。在故障叠加源的作用下, 在故障点 f_1 处产生向线路两端传播的电压初始反行波 u_{fm} 和前行波 u_{fn} 。线路本端的测量元件将检测到反行波 u_{fm} 的幅值变化率, 设电压初始行波到达测量端的时刻为 t_0 , 理想情况下测量端检测到的行波为直角波, 幅值 $|u_{fm}|$ 随时间的变化示意图如图 2 所示。

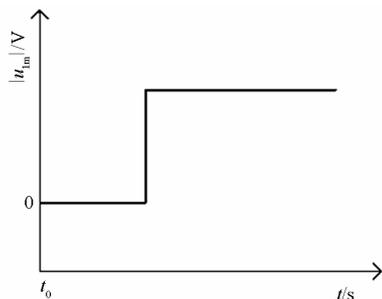


图 2 区内故障时幅值变化示意图

Fig. 2 Amplitude variation when internal fault occurs

如图 1(b)所示, 当正向区外 f_2 处发生故障时, 测量元件测得电压初始行波 u_{2m} 经并联电容 C_n 后的电压折射波 u_{2mr} 的幅值变化率, 其幅值变化如图 3 所示。

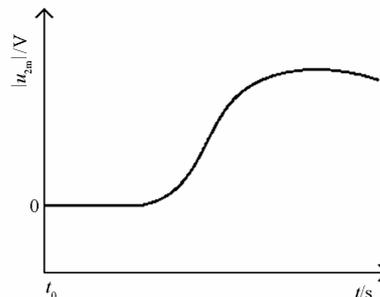


图 3 区外故障时幅值变化示意图

Fig. 3 Amplitude variation when external fault occurs

由彼得逊法则可知, 故障点初始行波经过并联电容 C_n 后, 电压的反射波和折射波 u_{2mb} 、 u_{2mr} 分别为:

$$u_{2mb} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} u_{2m} + \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_{2m} e^{-(t-t_0)/T} \quad (1)$$

$$u_{2mr} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} u_{2m} (1 - e^{-(t-t_0)/T}) \quad (2)$$

式中: T 为回路的时间常数, $T = C_n * Z_1 Z_2 / (Z_1 + Z_2)$ 。

公式(1)、(2)说明, 当行波通过边界电容元件时, 波头被拉长, C 越大, T 越大, 波头也就越平缓。当发生区外故障时, 初始反行波到达保护安装处需通过边界元件, 行波波头陡度就会降低。因此, 单端量行波保护的适用条件是区内外故障时初始反行波陡度有较大差异。

基于故障特征差异, 单端量行波保护的判据为

$$dU_{abs \max} > dU_{1b \text{ set}} \quad (3)$$

式中: $dU_{1b \text{ set}}$ 为动作门槛值, 按躲过区外最严重故障发生时的电压反行波幅值变化率最大值整定; $dU_{abs \max}$ 为故障后初始电压反行波幅值变化率。

若满足动作判据, 则判定为区内故障; 否则, 判定为区外故障。

2 柔性直流电网的故障特征分析

由于直流电缆的正负线路之间存在电磁耦合, 为降低耦合线路方程计算难度可以使用卡伦鲍厄相模变换矩阵^[11]使极电量变换为模电量, 具体变换过程在此不做赘述。由于 1 模电气参数的频率特性比 0 模稳定^[12], 不受行波色散的影响, 因此以下分析使用 1 模电气量。

考虑到配电网多分支的结构特点, 结合实际应

用,一般将电缆线路两侧直流电容后 30~50m 的线路处作为保护边界,在本文中取该线路长度为 50m。故障位置示意图如图 4 所示。

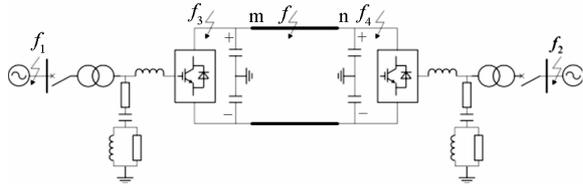


图 4 直流配电线路故障位置示意图

Fig. 4 Fault points of DC distribution line

如图 4 所示,直流线路两端分别为 m 端、n 端,本端 m 端装设线路保护。 f 表示区内故障; f_3 、 f_4 表示并联电容后区外直流线路故障; f_1 、 f_2 表示区外交流系统故障。

柔性直流线路上发生单极接地故障时,故障点 f 处的电压突降会造成能量扰动,从而磁场与电场能量便会相互转化,以行波的方式由故障点向线路两端传播。直流线路两端的并联电容形成行波边界,故障点产生的反行波传播至线路两端处发生全反射形成前行波。当区内电缆线路全长 90%处,发生正极经 10Ω 过渡电阻接地故障时,所测得 1 模电压前行波和反行波如下图 5 所示。图中故障发生时刻为 0.6 s,故障持续时间 0.1 s。

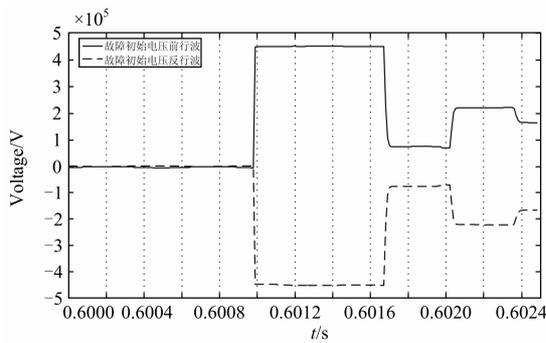


图 5 区内故障时 1 模电压反行波幅值变化图

Fig. 5 Backward traveling wave amplitude variation of line mode voltage when internal fault occurs

当区外直流线路上 f_3 或 f_4 处发生故障时,由于并联电容的存在,电压不能突变且只能按照指数规律变化;若区外交流系统 f_1 或 f_2 处发生故障,换流站内的平波电抗器和直流滤波器有平抑行波波头的作用,那么测得的变化率将会更小。当线路本端 f_3 处发生金属性接地故障时,1 模电压反行波幅值变化如图 6 所示。

综上所述,由于柔性直流线路中并联大电容等元件的存在,造成了区内和区外故障时的初始反行波幅值的变化率相差较大。

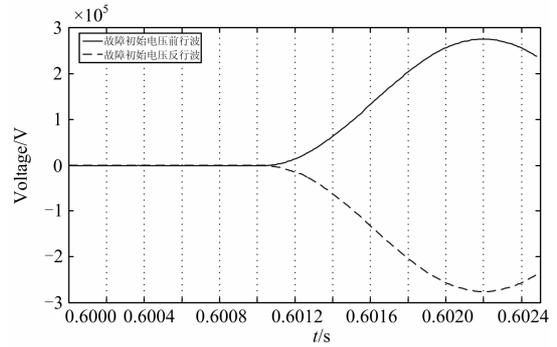


图 6 区外故障时 1 模电压反行波幅值变化图

Fig. 6 Backward traveling wave amplitude variation of line mode voltage when external fault occurs

3 行波保护在直流配电网中的适应性分析

从能量的角度分析,当区内线路发生故障时,由故障点向线路两端传播的初始反行波的波头非常陡;当发生区外故障时,反行波的波头陡度降低^[1]。因此,单端量行波保护原理适用性关键在于边界元件的性质。

中压柔性直流配电网中的边界元件为 $C = 0.0122F$ 的并联大电容,当发生区外故障时,初始反行波的波头被拉长,陡度降低。由此可见,单端量行波保护在理论上可应用于中压柔性直流配电网中。

单端量行波保护的判据式(3)中动作门限值 $dU_{1b\text{ set}}$ 应按避开区外直流线路上金属性故障发生时的电压反行波幅值变化率最大值整定。

4 仿真验证

4.1 柔性直流配电网的建模

本文在 PSCAD/EMTP 电磁仿真软件上搭建了中压柔性直流配电网的仿真模型。中压直流母线的电压等级取 $12kV$ ^[13],供电距离为 10km。考虑到用电负荷的分布的无规律离散性,本文采用辐射状^[14]的拓扑结构,如图 7 所示。

由图 7 可知,中压柔性直流配电网主要由电源、负荷、换流器和配电线路构成。

电源分为传统交流电源和分布式电源。其中,集中式新能源作为主电源使用是世界能源可持续发展的重要方向^[1],主要由直驱风机^[15]、光伏电站^[16-17]和蓄电池^[18]并联构成,其拓扑结构如图 8 所示。

直流负荷模型为恒功率+电阻的静态负荷模型^[19-20],其中恒功率负荷百分比约为 80%。动态负荷在本文中不做考虑。

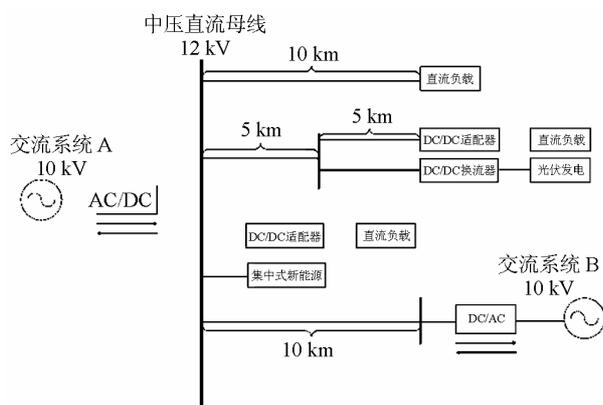


图 7 中压直流配电网的拓扑结构示意图

Fig. 7 Topology of mid-voltage DC distribution network

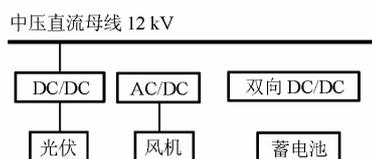


图 8 集中式新能源的拓扑结构示意图

Fig. 8 Topology of centralized new energy sources

换流器则分为整流器(AC/DC)、逆变器(DC/AC)和直流斩波器(DC/DC)。部分换流器根据元件特性有功率双向流动的功能,从而提高了供电的可靠性。直流斩波器主要用于光伏电站、储能系统以及直流负荷与直流配电网之间的能量交换。

中压柔性直流配电网配电线路采用频变参数模型的电缆线路,全长 10 km,仿真系统的采样时间约为 3 μ s,采样频率约为 333 kHz。系统运行始于 0 s,故障时刻为 0.6 s,持续时间 0.1 s。

以图 7 中标号⑤的分支配电线路设置故障进行仿真分析,其拓扑结构和故障位置同图 4 所示。

4.2 仿真验证

以正极接地故障为例,区内直流线路在不同位置、经不同过渡电阻发生故障时,由测量端测得的 1 模电压反行波幅值变化率的最大绝对值 $dU_{\text{abs max}}$ 如表 1 所示。

表 1 区内单极接地故障 1 模电压反行波幅值变化率

Table 1 Amplitude change rate of backward travelling wave of line mode voltage when mono-polar grounding fault occurs

接地电	不同位置 1 模电压反行波幅值变化率最大绝对值($\times 10^8 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$)				
阻/ Ω	0.9km	2.7km	5.4km	7.2km	9.0km
0	4.4191	4.0717	3.5326	3.1396	2.7502
5	2.5338	2.3351	2.0224	1.7948	1.5708
10	1.7771	1.6370	1.4167	1.2562	1.1989

由表 1 可知,当发生单极接地故障且过渡电阻小于 10 Ω 时,初始反行波斜率 $dU_{\text{abs max}}$ 的数量级可达到 $10^8 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$;在线路全长 90% 处、经 10 Ω 过渡电阻接地为区内最轻微故障,其变化率在表 1 中是最小的,为 $1.1989 \times 10^8 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。故障位置距离测量端越远,过渡电阻值越大,变化率也就越小。

在图 4 中 f_3 和 f_4 处设置极间故障,在 f_1 和 f_2 处设置三相接地和单相接地故障,得到 1 模电压反行波的幅值变化率如表 2 中所示。

表 2 区外故障 1 模电压反行波幅值变化率

Table 2 Amplitude change rate of backward travelling wave of line mode voltage when external fault occurs

接地电	区外时 1 模电压反行波幅值变化率最大绝对值($\times 10^7 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$)					
	阻/ Ω	f_1-1	f_1-3	f_3-2	f_4-2	f_2-3
0	0.0343	0.0349	9.7571	3.5171	0.0288	0.0352
5	0.0156	0.0135	8.1898	2.7563	0.0161	0.0196
10	0.0098	0.0087	7.3655	2.0079	0.0085	0.0112

由表 2 中可得,线路本端 f_3 处发生不经过渡电阻的极间故障时,是最严重的区外故障,1 模反行波幅值变化率最大,因此,行波保护的门槛值 $dU_{1b \text{ set}}$ 为 $9.7571 \times 10^7 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

当区内、区外发生故障时,结合表 1、表 2 得到行波保护的動作情况如表 3~表 4 所示。0 和 1 分别表示单端量行波保护不动作和動作。

表 3 区内线路不同位置保护動作结果

Table 3 Action results of relay when internal fault occurs

接地电	区内不同位置故障发生时保护動作结果				
	阻/ Ω	0.9km	2.7km	5.4km	7.2km
0	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1

表 4 区外线路不同位置保护動作结果

Table 4 Action results of relay when external fault occurs

接地电	区外不同位置故障发生时保护動作结果					
	阻/ Ω	f_1-1	f_1-3	f_3-2	f_4-2	f_2-3
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0

由表 3~表 4 可知,当过渡电阻小于 10 Ω 时,在区内任一点设置单极接地故障,保护都能可靠动作于故障线路;当发生区外故障时,保护区外不误动。

4.3 灵敏度校验

保护灵敏系数 K_{sen} 定义为

$$K_{\text{sen}} = \frac{\text{保护范围末端高阻接地时的 } dU_{\text{abs max}}}{\text{保护动作门槛值 } dU_{1\text{b set}}} \quad (4)$$

$dU_{\text{abs max}}$ 取本端直流大电容处经 10Ω 单极接地时 1 模电压反行波幅值变化率最大绝对值 $1.1989 \times 108 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$, 为 $9.7571 \times 107 \text{V} \cdot \text{s}^{-1}$, 可得灵敏系数值约为 1.3。一般保护灵敏系数值取 1.2~2 之间, 因此满足灵敏度要求。

5 结论

本文通过对行波保护原理和直流配电网故障特征的分析, 得出了行波保护在中压柔性直流配电网中的适用性, 并基于直流配电网的电磁暂态模型进行了仿真验证和灵敏度校验, 得出了单端量行波保护原理适用于中压柔性直流配电网的直流线路保护的初步结论, 为行波保护在直流配电网的深入研究提供借鉴。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 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.
- [4] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [5] 郑欢, 江道灼, 杜翼, 等. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 139-145.
ZHENG Huan, JIANG Daozhuo, DU Yi, et al. Economic comparison of AC and DC distribution system[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 139-145.
- [6] 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.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [7] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [8] BYEON G, LEE H, YOON T, et al. A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system[C] // 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia. Jeju Korea: IEEE, 2011: 543-550.
- [9] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [10] 董新洲, 刘建政, 余学文, 等. 输电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 57-61, 74.
DONG Xinzhou, LIU Jianzheng, YU Xuewen, et al. Fault characteristics and wavelets analysis of transient voltage traveling waves[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(3): 57-61, 74.
- [11] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.
SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [12] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- [13] 杨琪羽. 适应未来发展的直流配电电压等级序列研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
YANG Qiyu. Research on DC distribution voltage level sequences to adapt to future development[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [14] 胡竟竞. 直流配电系统故障分析与保护技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
HU Jingjing. Fault analysis and protection technology of DC distribution system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [15] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺, 等. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi, et al. Overview of

- equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [16] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tianjin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [17] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.
GUO Tianyong, ZHAO Gengshen, ZHAO Yao, et al. modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.
- [18] 王冕, 田野, 李铁民, 等. 应用于储能系统的双向DC-DC变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.
WANG Mian, TIAN Ye, LI Tiemin, et al. Study of bidirectional DC-DC converters applied to energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [19] 李玉梅, 查晓明, 刘飞, 等. 带恒功率负荷的直流微电网母线电压稳定控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 57-64.
LI Yumei, ZHA Xiaoming, LIU Fei, et al. Stability control strategy for DC microgrid with constant power load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 57-64.
- [20] 汤涌, 张红斌, 侯俊贤, 等. 考虑配电网的综合负荷模型[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 34-38.
SHANG Yong, ZHANG Hongbin, HOU Junxian, et al. A synthesis load model with distribution network[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 34-38.

收稿日期: 2016-02-24; 修回日期: 2016-06-26

作者简介:

陈福锋(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: fugiant@163.com

杨阳(1992-), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为柔性直流配电网的建模仿真与继电保护研究; E-mail: yangyang920617@yeah.net

宋国兵(1972-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: song.gb@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 张爱琴)