

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191030

柔性直流配电系统负荷波动对系统过电压及过电流影响研究

梁汉东¹, 高毓群², 侯婷³, 蔡明⁴, 张竞涵², 韩永霞², 肖芳磊², 黄廷城⁵

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;

2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080;

4. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510620; 5. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510670)

摘要: 柔性直流配电系统因其诸多优势而成为未来智能电网的重要发展趋势, 而系统故障中的过电压和过电流分析及其防护方法研究是其关键技术之一。由于柔性直流配电系统所接入的负荷具有波动性和间歇性等特性, 故针对±10 kV 两端柔性直流配电系统开展了负荷波动对系统过电压及过电流影响研究。分析了故障下电压和电流的产生机理、影响因素以及负荷波动对电压和电流影响情况, 并提出了后续研究中负荷的等效建模方法。首先根据两端柔性直流配电系统拓扑结构, 在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序中建立其仿真模型。其次, 根据系统接口设备拓扑结构, 理论分析接口设备出口发生单极接地故障和双极短路故障下电压和电流的产生机理、影响因素以及负荷波动对电压和电流影响情况。最后, 仿真验证接口设备出口发生单极接地故障和双极短路故障下负荷不同波动方式对电压和电流的影响, 并提出负荷的等效建模方法。

关键词: 柔性直流配电系统; 过电压; 过电流; 负荷波动

Study on the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent of a VSC-DC distribution system

LIANG Handong¹, GAO Yuqun², HOU Ting³, CAI Ming⁴, ZHANG Jinghan², HAN Yongxia², XIAO Fanglei², HUANG Tingcheng⁵

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. China Southern

Power Grid Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China; 4. Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510620, China; 5. Guangzhou Power Electric Technology Co., Ltd., Guangzhou 510670, China)

Abstract: The VSC-DC distribution system has become an important trend for development of the smart grid because of its advantages. Analysis of overvoltage and overcurrent in typical faults and their protection methods is a key aspect. Because the loads connected to the VSC-DC distribution system have characteristics of fluctuation and intermittence, this paper studies the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent of a ±10 kV two-terminal VSC-DC distribution system. The generation mechanism and influencing factors of overvoltage and overcurrent under fault and the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent are analyzed, and the equivalent modeling method of loads for subsequent research is proposed. First, according to the topology of a two-terminal VSC-DC distribution system, a simulation model is established in PSCAD/EMTDC. Secondly, according to the topological structure of the plug-in devices, the generation mechanism and influencing factors of overvoltage and overcurrent under pole-to-ground fault and pole-to-pole fault at the line side of the plug-in devices, as well as the influence of load fluctuation on over-voltage and overcurrent are analyzed theoretically. Finally, the influence of different load fluctuation modes on overvoltage and overcurrent under pole-to-ground fault and pole-to-pole fault at the line side of the plug-in devices is verified by simulation, and an equivalent load modeling method is proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807068).

Key words: VSC-DC distribution system; overvoltage; overcurrent; load fluctuation

0 引言

随着分布式能源技术、储能技术、敏感负荷、

数据中心和电动汽车等的迅速发展, 交流配电系统将面临一系列电能质量问题^[1-3]。而基于电压源型换流器的直流配电系统因可实现分布式能源的并网及消纳、敏感负荷接入、电动汽车并网等优势逐渐成为国内外研究热点^[4-5]。其中, 基于模块化多电平换

基金项目: 国家自然科学基金资助(51807068)

流器的柔性直流配电系统逐渐成为未来“互联网+”智慧能源发展的重要连接方式之一^[6-7]。目前已有几个柔性直流配电网示范工程投入运行,如杭州、贵州、张北、珠海±10 kV 柔性直流配电网工程^[8-10],其中珠海采用三端换流站互联拓扑结构,贵州采用放射状拓扑结构;此外也有相关的设计方案,如深圳宝龙工业园两端“手拉手”柔性直流配电系统设计方案^[11]。

但目前柔性直流配电系统尚有许多关键技术问题有待深入研究。其中,当系统发生故障时产生的过电压和过电流将严重威胁系统的安全可靠运行,针对此问题,目前有许多学者对柔性直流配电系统过电压和过电流防护方案开展了研究。在过电压防护方面,文献[12]提出了±10 kV 两端柔性直流配电系统的过电压分析方法及避雷器配置方案。在过电流防护方面,目前国内外学者已提出多种限流方法,主要是通过增大故障回路阻抗以减小故障电流,分为串接电感型或电阻型限流器^[13-21],但上述研究中均未考虑系统所接入负荷波动带来的影响。

由于柔性直流配电系统所接入的负荷具有波动性和间歇性等特性,当系统处于稳态运行时,由于系统采用定电压控制,负荷的波动不会给系统带来过电压和过电流;而当系统发生故障时,如双极短路故障,由于故障的存在隔离了系统的控制,该情

况下负荷的波动可能对系统的过电压和过电流造成影响,因此有必要针对负荷波动对系统过电压和过电流的影响开展研究。

针对上述问题,本文首先根据两端柔性直流配电系统拓扑结构,在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真程序中建立其仿真模型;其次,根据系统接口设备拓扑结构,理论分析接口设备出口发生单极接地故障和双极短路故障下电压和电流的产生机理、影响因素以及负荷波动对电压和电流影响情况;最后,根据上述建立的仿真模型,仿真验证接口设备出口发生单极接地故障和双极短路故障下负荷不同波动方式对电压和电流的影响,并研究后续仿真中负荷的等效建模方法。

1 系统拓扑结构及仿真建模

1.1 系统拓扑结构

考虑到本文主要研究负荷波动对系统过电压及过电流的影响,因此以某±10 kV 两端“手拉手”柔性直流配电系统为例进行分析,拓扑结构如图 1 所示。系统采用对称单极主接线形式,各类负荷通过对应的接口设备接入配电系统,其中接口设备包括 DC/DC 直流变压器(DC Solid State Transformer, DCSST)和 DC/AC 两电平换流器(Voltage Sourced Converter, VSC)。

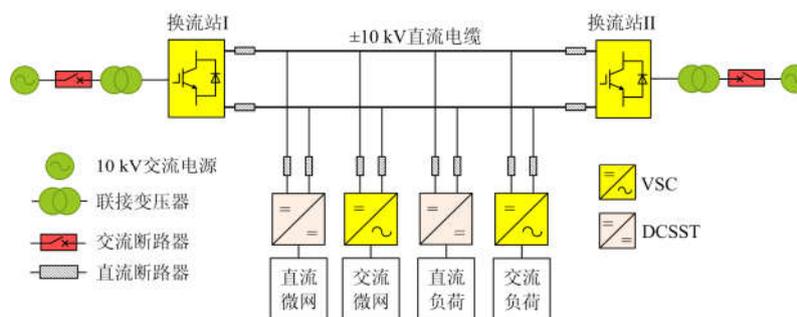


图 1 ±10 kV 两端柔性直流配电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of ±10 kV VSC-DC distribution system

系统所接入负荷可分为两类,分别为具备功率反送能力的交、直流微电网和不具备功率反送能力的交、直流负荷。其中,直流微电网和直流负荷通过 DCSST 接入配电系统;交流微电网和交流负荷通过 VSC 接入配电系统^[22-24]。

1.2 系统仿真建模

在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 1 所示的±10 kV 柔性直流配电系统仿真模型。其中换流站子模块采用戴维南等效建模,换流站 I 采用定电压控制模式,换流站 II 采用定功率控制模式;直流断路器采用时

控开关等效;直流电缆采用频域相关的线路模型。

系统所接入的负荷在运行过程中可能出现的波动方式可分为两类:1)波动性,即负荷功率随时间缓慢变化;2)间歇性,即负荷功率出现瞬时变化。其中,对于负荷的波动性,不具备功率反送能力的负荷将在 0 和 P_{\max} 间波动,具备功率反送能力的负荷将在 $-P_{\max}$ 和 P_{\max} 间波动,本文在仿真中采用如图 2 所示的负荷变化模拟负荷的波动性。对于负荷的间歇性,分为负荷的瞬时投入和切除,本文在仿真中采用如图 3 所示的负荷变化模拟负荷的间歇性。

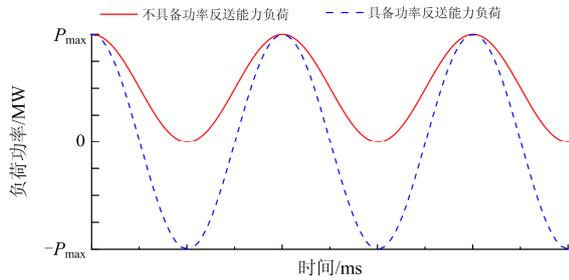


图 2 负荷波动性模拟

Fig. 2 Fluctuated load simulation

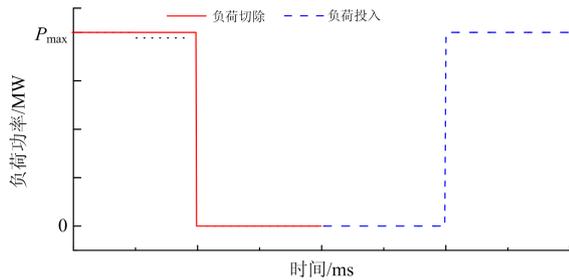


图 3 负荷间歇性模拟

Fig. 3 Intermittent load simulation

2 接入负荷波动对系统过电压和过电流影响理论分析

2.1 单极接地故障

考虑到系统发生单极接地故障时将产生过电压，而过电流程度较小^[25]，因此对于单极接地故障，分析接入负荷波动对系统过电压的影响。当系统发生单极接地故障时，以接口设备出口发生单极接地故障为例，故障极电压将降为零，而非故障极电压将上升为正常运行时的 2 倍，因此故障期间存在对非故障极电容充电过程，其充电通路如图 4 所示。图中①为接口设备向非故障极电容充电，②为 MMC(Modular Multilevel Converter)向非故障极电容充电。

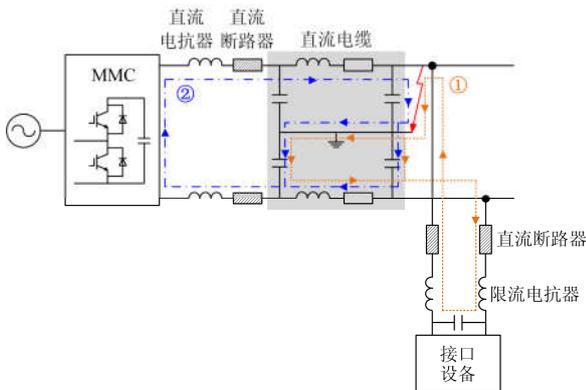


图 4 非故障极电容充电过程

Fig. 4 Charging process of normal pole capacitor

由于非故障极电压为接口设备和换流器向非故障极电容充电所产生，该充电过程与接口设备和换流器电容电压和系统参数有关，故负荷波动不会影响非故障极电容的充电过程。

2.2 双极短路故障

考虑到系统发生双极短路故障时将产生过电流，而极间电压降为零，因此对双极短路故障，分析接入负荷波动对系统过电流的影响。当系统发生双极短路故障时，以接口设备出口发生双极短路故障为例，由于接口设备出口的并联电容直接对短路点放电，导致故障电流迅速上升，以 DCSST 为例，VSC 同理，其放电通路如图 5 中①所示。同时，当负荷端为不具备功率反送能力的负荷时，需要消耗一定的功率，故接口设备出口的并联电容还需向负荷提供功率，其放电通路如图 5 中②所示；当负荷端为具备功率反送能力的负荷时，负荷端可对短路点放电，其放电通路如图 5 中③所示。

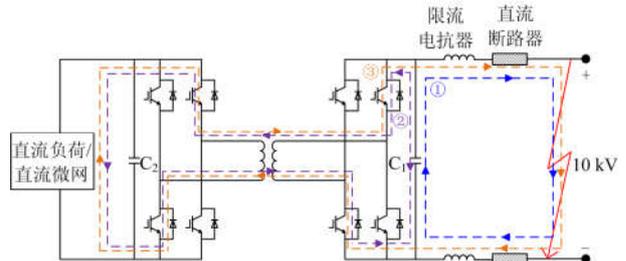


图 5 DCSST 出口双极短路故障放电通路

Fig. 5 Discharge circuit of pole-to-pole fault at the line side of DCSST

由图 5 可知，对于不具备功率反送能力的负荷，当负荷呈现波动性变化或切除时，其等效负荷减小，故接口设备出口并联电容向负荷端放电电流减小，导致接口设备出口故障电流增大。而与负荷的波动性相比，由于负荷切除后接口设备电容不再向负荷放电，故其故障电流更大。对于负荷的投入，负荷增大导致接口设备出口并联电容向负荷端放电电流增大，因此接口设备出口故障电流减小。

对于具备功率反送能力的微电网，其故障电流为电容放电电流叠加微电网放电电流，因此接口设备出口将产生更严重的过电流。

而为防止电力电子器件受到故障电流冲击，通常在发生双极短路故障后闭锁接口设备以保护电力电子器件，其中 DCSST 闭锁后放电通路如图 6 所示。

由图 6 可知，DCSST 闭锁后出口并联电容无法向负荷端放电，同时直流微电网也无法通过短路点放电，因此闭锁后 DCSST 出口双极短路故障下仅为出口电容向短路点放电，此时负荷的变化不影响出口故障电流。

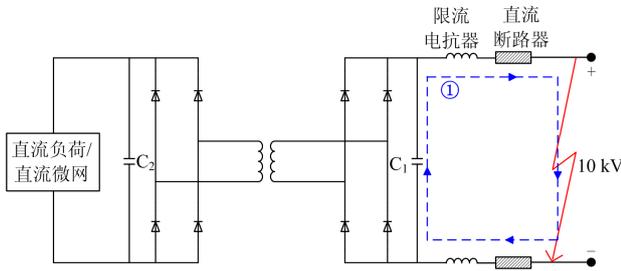


图 6 闭锁后 DCSST 出口双极短路故障放电通路

Fig. 6 Discharge circuit of pole-to-pole fault at the line side of DCSST after blocking

对于 VSC, 闭锁后放电通路如图 7 所示。

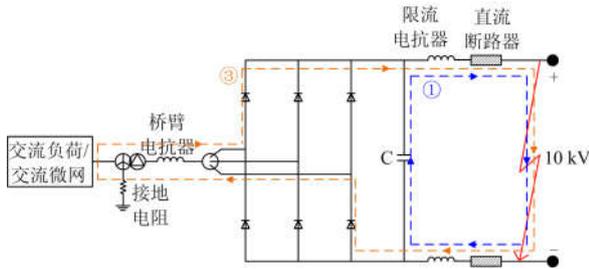


图 7 闭锁后 VSC 出口双极短路故障放电通路

Fig. 7 Discharge circuit of pole-to-pole fault at the line side of VSC after blocking

由图 7 可知, VSC 闭锁后出口并联电容无法向负荷端放电, 但桥臂电抗器所存储的能量仍能够通过并联二极管向短路点放电。对于不具备功率反送能力的交流负荷, 交流负荷需要消耗一定的桥臂电抗器所存储的能量, 故与满负荷运行相比, 负荷的波动和切除情况下桥臂电抗器向负荷端放电电流减小, 因此出口故障电流增大, 且负荷切除情况下故障电流将大于负荷波动情况。对于具备功率反送能力的交流微电网, 交流微电网可通过并联二极管向短路点放电, 因此与满负荷运行相比, 其出口故障电流增大。

基于上述分析, 双极短路故障下的过电流主要由接口设备出口电容向短路点放电产生, 与故障瞬接口设备出口极间电压、负荷大小以及设备参数有关, 负荷波动不会影响故障期间的放电过程, 只会影响电流峰值, 因此故障后电流波形相似。由于系统采用定电压控制, 因此当系统参数已确定时, 过电流大小仅与故障期间负荷大小相关, 且故障期间负荷越大过电流越小。

3 接入负荷波动对系统过电压和过电流影响仿真验证

基于 1.2 节建立的仿真模型, 仿真验证接入负

荷波动对系统过电压和过电流的影响。其中, 换流站、接口设备与接入负荷参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 换流站参数

Table 1 Converter station parameters

参数	换流站 I	换流站 II
主接线方式	半桥 MMC 对称单极	半桥 MMC 对称单极
额定容量/MVA	25	25
直流侧额定电压/kV	± 10	± 10
直流侧额定电流/kA	1.25	1.25
子模块数	25	25
子模块电容值/ μF	31 178	31 178
桥臂电抗器/mH	2.5	2.5
直流电抗器(每极)/mH	8	8

表 2 接口设备与接入负荷参数

Table 2 Plug-in devices and loads parameters

参数	DCSST1	VSC1	DCSST2	VSC2
负荷侧电压	400 Vdc	380 Vac	400 Vdc	10 kVac
线路侧电容值/ μF	10 000	1 500	10 000	1 500
限流电抗器(每极)	5 mH	3 mH	5 mH	3 mH
负荷类型	直流微网	交流微网	直流负荷	交流负荷
功率/MW	-4~4	-3.5~5	0~4	0~8

3.1 单极接地故障

仿真中设置系统进入稳态后接口设备出口发生单极接地故障, 故障持续时间设置为 1 s 以模拟永久性故障, 仿真得到接入负荷在图 2 和图 3 波动情况下 DCSST1 出口非故障极电压如图 8 所示。

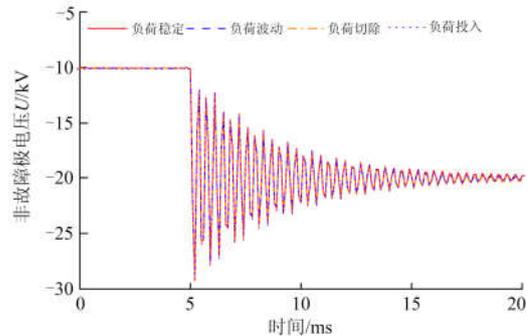


图 8 DCSST1 出口单极接地故障非故障极电压波形

Fig. 8 Normal pole voltage waveform of pole-to-ground fault at the line side of DCSST1

由图 8 可知, 当 DCSST1 出口发生单极接地故障时, 不同负荷波动方式下非故障极电压波形一致, 即负荷波动对过电压无影响。对于其他三类接口设备出口发生单极接地故障时, 非故障极电压波形与

图 8 类似, 负荷波动对过电压无影响。因此, 在后续研究系统的过电压特性时可将接入负荷等效成固定容量的负荷。

3.2 双极短路故障

仿真中设置系统进入稳态后接口设备出口发生双极短路故障, 故障持续时间设置为 1 s 以模拟永久性故障。考虑到“负荷投入”工况负荷的初始状态为 0, 而“负荷稳定”、“负荷波动”和“负荷切除”三种工况负荷的初始状态为 P_{max} 。因此仅对比“负荷稳定”、“负荷波动”和“负荷切除”三种工况对故障电流的影响。仿真得到 DCSST 接入负荷在图 2 和图 3 波动情况下出口电流波形分别如图 9 和图 10 所示。

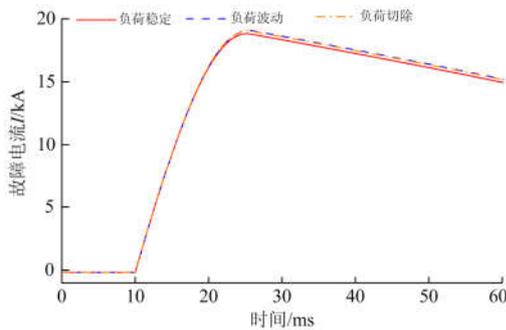


图 9 DCSST1 出口双极短路故障电流波形
Fig. 9 Fault current waveform of pole-to-pole fault at the line side of DCSST1

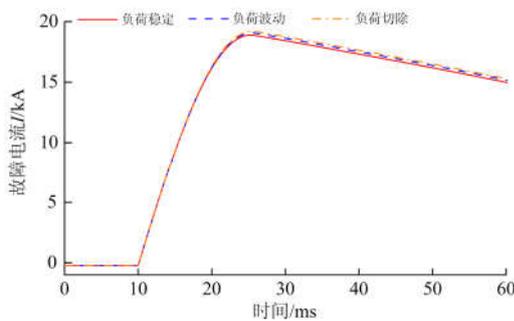


图 10 DCSST2 出口双极短路故障电流波形
Fig. 10 Fault current waveform of pole-to-pole fault at the line side of DCSST2

由图 9 可知, 负荷波动不会影响故障期间的放电过程, 故在不同负荷波动方式下电流波形相似。但由于直流微电网具有功率反送能力, 在图 2 负荷波动情况下能向故障点放电, 故在三种情况下具有最严重的过电流。而负荷切除后 DCSST1 出口电容不向负荷供电, 因此相比于稳定负荷下也有更严重的过电流。而由于负荷容量较小, 且存在变压器和限流器的阻抗作用, 不同波动方式下过电流峰值相

差 2%, 因此可认为在该情况下负荷波动对过电流峰值基本无影响。VSC1 出口双极短路故障电流波形与图 9 类似。

同理, 由图 10 可知, 由于直流负荷不具有功率反送能力, 在图 2 负荷波动情况下其等效负荷变小, 因此 DCSST2 出口电容向负荷端供电减小, 故相比于稳定负荷下具有更严重的过电流; 而负荷切除后 DCSST2 出口电容不向负荷端供电, 因此具有最严重的过电流, 其中不同波动方式下过电流峰值相差 1.6%, 可认为在该情况下负荷波动对过电流峰值基本无影响。VSC2 出口双极短路故障电流波形与图 10 类似。

为防止电力电子器件受到故障电流冲击, 在仿真设置故障 1 ms 后闭锁接口设备以保护电力电子器件, 得到 DCSST 和 VSC 出口电流波形分别如图 11 和图 12 所示。

由图 11 可知, 闭锁后负荷波动对 DCSST1 出口电流无影响。这是由于闭锁后 DCSST1 出口电流仅由电容放电产生, 直流微电网也无法向短路点放电, 因此负荷的变化不影响出口故障电流。DCSST2 出口电流波形与图 11 类似。

由图 12 可知, 闭锁后负荷波动对 VSC 出口电流基本无影响, 这是由于 VSC 桥臂电抗器所存储的能量较少, 其放电过程对电容放电过程影响较小。

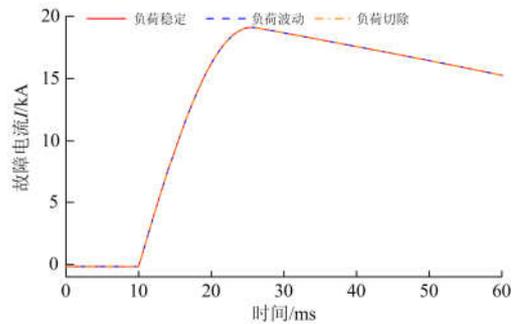
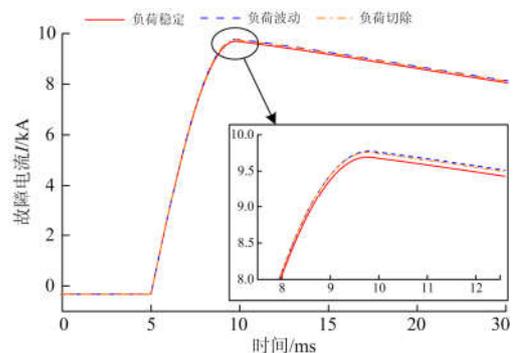


图 11 闭锁后 DCSST1 出口双极短路故障电流波形
Fig. 11 Fault current waveform of pole-to-pole fault at the line side of DCSST1 after blocking



(a) 闭锁后 VSC1 出口双极短路故障电流波形

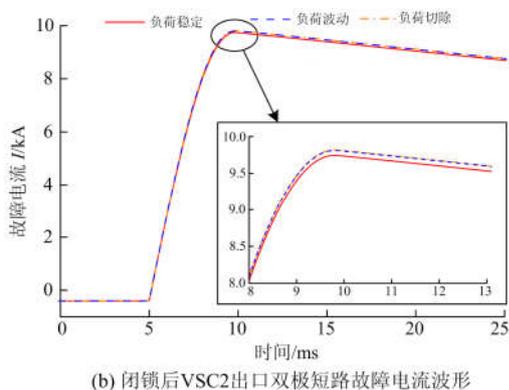


图 12 闭锁后 VSC 出口双极短路故障电流波形

Fig. 12 Fault current waveform of pole-to-pole fault at the line side of VSC after blocking

由图 12(a)可知,对于具有功率反送能力的交流微网,负荷波动情况下具有最严重的过电流,这是由于在负荷波动情况下能够向故障点放电;而负荷切除情况比稳定情况具有更严重的过电流,这是由于负荷切除后桥臂电抗器不再向负荷放电,从而产生更严重的过电流。

由图 12(b)可知,对于不具有功率反送能力的交流负荷,负荷波动和负荷切除都产生更严重的过电流,这是由于负荷的变小导致桥臂电抗器向负荷放电减小,而由于负荷切除后桥臂电抗器不再向负荷放电,从而产生更严重的过电流。

基于上述分析,由于双极短路故障下过电流主要由接口设备出口电容向故障点放电产生,负荷波动不会影响故障期间的放电过程,故在不同负荷波动方式下电流波形相似。而故障期间负荷大小将影响到过电流峰值,故障期间负荷的减小将导致过电流增大,负荷的增加导致过电流的减小。由于交/直流微电网具有功率反送能力,故障后将产生更严重的过电流。当系统负荷容量较小时,且由于存在变压器和限流器的阻抗作用,负荷变化对过电流峰值所产生的影响也较小。

因此,在后续研究系统的故障特性时可系统的接入负荷等效成固定负荷。若要研究系统最严重的故障工况,对于不具备功率反送能力的交/直流负荷以 0 MW 进行等效,对于具备功率反送能力的交/直流微电网以其反送的最大功率进行等效。

4 结论

本文针对±10 kV 两端柔性直流配电系统开展了系统接入负荷波动对过电压和过电流影响研究,分析了故障下电压和电流的产生机理、影响因素以及负荷波动对电压和电流影响情况,并提出了后续

研究中负荷的等效建模方法,主要结论如下:

1) 单极接地故障下非故障极电压为接口设备和换流器子模块电容向非故障极电容充电所产生,负荷波动不会影响非故障极电容的充电过程。

2) 双极短路故障下电流主要为接口设备出口电容向故障点放电产生,负荷波动不会影响故障期间的放电过程,在不同负荷波动方式下电流波形相似。故障期间不具备功率反送能力负荷的减小将导致过电流增大,而对于具有功率反送能力的负荷,故障后将产生更严重的过电流,当系统负荷容量较小时,且由于存在变压器和限流器的阻抗作用,负荷变化对过电流峰值所产生的影响也较小。

3) 在后续研究系统的故障特性时可接入负荷等效成固定负荷。若要研究系统最严重的故障工况,对于不具备功率反送能力的交/直流负荷以 0 MW 进行等效,对于具备功率反送能力的交/直流微电网以其反送的最大功率进行等效。

参考文献

- [1] 王一振, 赵彪, 袁志昌, 等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3551-3560.
WANG Yizhen, ZHAO Biao, YUAN Zhichang, et al. Study of the application of VSC-based DC technology in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3551-3560.
- [2] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [3] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [4] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.
- [5] BARAN M E, MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems: opportunities and challenges[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1596-1601.
- [6] 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.
- [7] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.

- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [8] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方案[J]. 供用电, 2018, 35(1): 34-39.
- XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou power grid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 34-39.
- [9] 傅守强, 高杨, 陈翔宇, 等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术与工程实践[J]. 电力建设, 2018, 39(5): 46-55.
- FU Shouqiang, GAO Yang, CHEN Xiangyu, et al. Research and project practice on AC and DC distribution network based on flexible substations[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5): 46-55.
- [10] QU Lu, YU Zhanqing, SONG Qiang, et al. Planning and analysis of the demonstration project of the MVDC distribution network in Zhuhai[J]. Frontiers in Energy, 2019, 13(1): 120-130.
- [11] 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.
- [12] 何秋萍, 韩永霞, 赵宇明, 等. ± 10 kV 直流配电系统过电压与绝缘配合[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 16-22.
- HE Qiuping, HAN Yongxia, ZHAO Yuming, et al. Overvoltage and insulation coordination of ± 10 kV DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 16-22.
- [13] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
- XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [14] XU Yan, LIU Jingyan, FU Yuan. Fault-line selection and fault-type recognition in DC systems based on graph theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 267-276. DOI: 10.1186/s41601-018-0098-9.
- [15] 王振浩, 刘婕, 李国庆, 等. 采用桥臂电抗器耦合的 MMC 直流侧故障过电流抑制新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 9-15.
- WANG Zhenhao, LIU Jie, LI Guoqing, et al. A new method of over current suppression based on coupled bridge arm reactors for DC faults of modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 9-15.
- [16] WANG Yizhen, YUAN Zhichang, FU Jiao, et al. A feasible coordination protection strategy for MMC-MTDC systems under DC faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 103-111.
- [17] LI Bin, HE Jiawei, TIAN Jie, et al. DC fault analysis for modular multilevel converter-based system[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(2): 275-282.
- [18] 郭子轩, 韩永霞, 赵宇明, 等. 基于柔性直流的配电系统关键设备暂态电流研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1280-1288.
- GUO Zixuan, HAN Yongxia, ZHAO Yuming, et al. Study on transient current of the key equipment in flexible DC power distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1280-1288.
- [19] LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A hybrid current-limiting circuit for DC line fault in multi-terminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5595-5607.
- [20] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5122-5133.
- LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5122-5133.
- [21] LI Bin, HE Jiawei. Studies on the application of R-SFCL in the VSC-based DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(3).
- [22] JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. Overall control scheme for VSC-based medium-voltage DC power distribution networks[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(6): 1438-1445.
- [23] 刘国伟, 赵彪, 赵宇明, 等. 中压柔性直流配电技术在深圳电网的应用框架[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 1-10.
- LIU Guowei, ZHAO Biao, ZHAO Yuming, et al. Application framework of VSC medium-voltage DC distribution technology in Shenzhen Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 1-10.
- [24] 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.
- [25] 戴志辉, 黄敏, 苏怀波. 基于 MMC 的环状直流配网在不同接地方式下的故障特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 1-10.
- DAI Zhihui, HUANG Min, SU Huaibo. Analysis on fault characteristics of MMC-based ring DC distribution networks under different grounding modes[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 1-10.

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-10-22

作者简介:

梁汉东(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为输变电工程设计。E-mail: lianghandong@gedi.com.cn

(编辑 姜新丽)