

# Study on Fault Protection of DC Distribution System Based on Short-Circuit Reactor

Xiaojun Chen<sup>1\*</sup>, Zilong Xiao<sup>1</sup>, Chi Zhang<sup>1</sup>, Wen Pan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation Limited, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Eastern Power Supply Sub-Bureau of Zhongshan Power Supply Bureau, Zhongshan Guangdong

Email: \*chenarmy11@qq.com

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2018; accepted: Nov. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Nov. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper analyzes the fault process of a multi-terminal DC power distribution system to obtain the equivalent circuit when the multi-terminal DC power distribution system fails, and then calculates the fault current of the multi-terminal DC power distribution system and analyzes the fault characteristics of the system. Through simulation, it is found that when the system fails, it is difficult to distinguish between bus faults and feeder faults based on the short-circuit current characteristics. Therefore, this article proposes to install a series reactor at the outlet of the feeder so that the short-circuit current of the bus fault and the short-circuit current of the feeder fault can be distinguished well in the amplitude characteristics and waveform characteristics, thus providing a criterion for the protection of the multi-terminal DC power distribution system.

## Keywords

Multi-Terminal DC Distribution System, Short-Circuit Fault, Short-Circuit Reactor, Distribution Protection, Equivalent Circuit

---

# 一种基于短路电抗器的直流配网故障保护方法研究

陈小军<sup>1\*</sup>, 肖子龙<sup>1</sup>, 张弛<sup>1</sup>, 潘文<sup>2</sup>

<sup>1</sup>广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州

<sup>2</sup>中山供电局东区供电分局, 广东 中山

Email: \*chenarmy11@qq.com

收稿日期: 2018年11月6日; 录用日期: 2018年11月21日; 发布日期: 2018年11月28日

---

\*通讯作者。

文章引用: 陈小军, 肖子龙, 张弛, 潘文. 一种基于短路电抗器的直流配网故障保护方法研究[J]. 智能电网, 2018, 8(6): 516-524. DOI: 10.12677/sg.2018.86056

## 摘要

本文在分析多端直流配电系统故障过程的情况下,得出多端直流配电系统故障时的等效电路,并在此基础上计算多端直流配电系统的故障电流,分析该系统的故障特性,并通过仿真发现该系统发生故障时,依据短路电流特性很难区分母线故障还是馈线故障。因此,本文提出在馈线出口处加装串联短路电抗器,使得母线故障短路电流和馈线故障短路电流在幅值特征和波形特征能够较好区分,为多端直流配电系统的保护提供了判据。

## 关键词

多端直流配电系统, 短路故障, 短路电抗器, 配电保护, 等效电路

Copyright © 2018 by authors 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

为了满足对低碳环保和气候治理的需求,全球用能结构日趋改善。其中,清洁能源占比和电能替代率都越来越高,用能结构更加复杂化。配网端的分布式能源渗透率和电动汽车普及率逐年提高,特别是直流电源和负荷越来越多,对配电网的结构和运行提出了新的要求。目前的直流配电系统按照拓扑结构的不同主要可以分为辐射状直流配电系统、双电源直流配电系统、多端直流配电系统[1] [2] [3] [4] [5]。辐射状直流配电系统拓扑结构简单,所有设备连接于直流母线上,接入方便,但是可靠性差。双电源配电系统采用一端直流供电,一端交流供电的形式,保证负荷能够满足双电源的要求。负荷接在两个电源之间,可靠性有所提高,但是灵活性不足。同时,光伏、风机等直流电源,智能家居等直流负荷,电动汽车、储能蓄电池等双向换能设备的接入,对直流配电系统提出了新的要求。未来的直流配电系统既要满足灵活接入、即插即用的功能,又要保证供电的可靠性和电能质量的要求[6] [7] [8]。

未来直流配电系统将应用于例如大型写字楼、社区直流微电网等。随着直流微电网越来越复杂,势必形成多电源的直流配电系统,也就是所谓的多端直流配电系统[9] [10] [11]。多端直流配电系统能够灵活接入电源、负荷、双向换能设备,大大提高了直流配电系统的供电可靠性。同时,为节约成本,考虑在多端配电系统的出线处仅安装隔离开关,只有在电源点接入点和储能蓄电池接入点安装断路器和直流电流传感器[12] [13] [14] [15]。随着多端配电系统接入点的增加,设备之间互相联系越来越多,当系统发生短路故障时,对继电保护提出了新的要求。本文将分析多端直流配电系统发生短路故障时的短路电流特性,并提出相应的解决方法。

## 2. 网架结构

典型的多端直流配电系统包括交流配电网、光伏电源、储能设备、直流负荷等设备的接入。未来多端直流配电系统的接入节点会更多,网架会更加复杂。按照接入节点的类型,将接入设备分为交流电源、直流电源、直流负荷、交流负荷和双向设备。例如交流配电网属于交流电源、光伏属于直流电源、电池属于双向设备。在多端直流配电系统中,交流配电网接入多端直流配电系统通过不可控双向整流设备、滤波设备、直流调压电路、直流短路器组成。光伏设备接入多端直流配电系统通过滤波设备、直流调压

电路、直流断路器组成。储能蓄电池接入多端直流配电系统通过双向变换器和直流断路器组成。本文基于图 1 所示的多端直流配电系统，详细介绍其网架结构、分析其短路电流特性，并提出加装短路电抗器，利用其微分特性为保护提供动作判据。

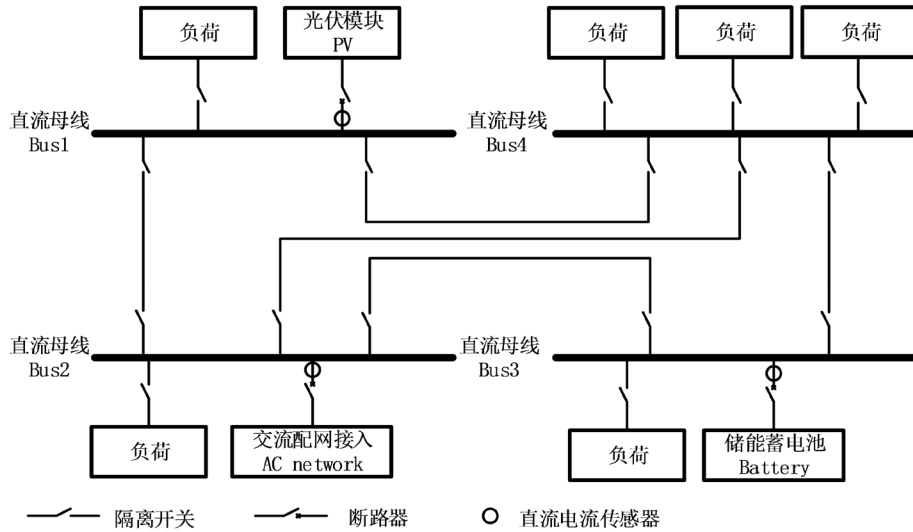


Figure 1. Structure of multi-terminal DC distribution system  
图 1. 多端直流配电系统结构图

### 3. 等效电路与短路电流分析

为分析短路电流特征和仿真需要，将系统发生短路时的电路作等效处理。基于等效电路，可以计算短路电流大小，建立仿真模型。

当系统发生故障时，从电源侧看的等效电路包括电源到母线所有设备的等效以及故障点到母线的线路等效。图 2 给出了交流配电网作为电源时，从整流器侧看的等效电路。当发生母线故障时，线路参数为零，只需将滤波器、直流调压器、母线作等效即可，表示为  $F_1$ ；当发生其他故障时，需要加入故障点到母线处的等效参数，表示为  $F_{other}$ 。图 2 中的  $L_f$  和  $R_{Lf}$  表示了滤波器的电感支路等效电路， $C_f$  和  $R_{Cf}$  表示了滤波器的电容支路等效电路。 $L_{BC}$  和  $R_{LBC}$  表示了直流调压器的等效电路。 $C_{Bus}$  和  $R_{CBus}$  表示了直流母线的等效支路，参数 2 表示两条母线。当母线发生金属性正负极短路时，短路支路  $F_1$  等效为一条导线；当母线发生带电阻短路时，支路  $F_1$  等效为符合短路特征的相应参数。当相邻母线或者馈线发生故障时，短路支路加入相应线路等效参数即可。

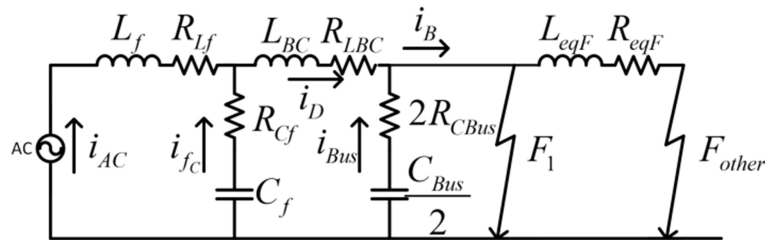
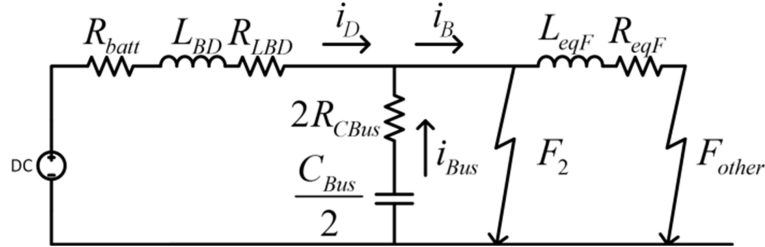


Figure 2. Equivalent circuit of short-circuit fault on the side of AC distribution  
图 2. 短路故障反应在交流配电网侧的等效电路

图 3 表示系统发生故障时，从储能蓄电池侧看的等效电路。 $F_2$  表示发生了母线故障； $F_{other}$  表示发

生了其他故障。 $R_{batt}$  表示储能蓄电池内阻,  $L_{BD}$  和  $R_{LBD}$  表示双向变换器的等效支路,  $C_{Bus}$  和  $R_{C_{Bus}}$  表示母线等效支路, 参数 2 表示两条母线。当母线发生金属性正负极短路时, 短路支路 F2 等效为一条导线; 当母线发生带电阻短路时, 支路 F2 等效为符合短路特征的相应参数。当相邻母线或者馈线发生故障时, 短路支路加入相应线路等效参数即可。



**Figure 3.** Equivalent circuit of short-circuit fault on the side of energy storage  
**图 3.** 短路故障反应在储能蓄电池侧的等效电路

由等效电路可知, 当系统发生线路故障时, 由于该多端直流系统应用于微电网, 馈线线路不长, 导致线路故障和母线故障在等效电路上相差不大。以储能蓄电池发生母线故障和线路故障为例, 具体分析如下。

当发生母线故障 F2 时, 短路电流如公式(1)所示。

$$\begin{cases} i_D = i_B \\ E_{DC} - (R_{batt} + R_{LBD})i_D - L_{BD} \frac{di}{dt} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由(1)可解得:

$$\begin{cases} i_D = i_B = \frac{E_{DC}}{R_{batt} + R_{LBD}} (1 - e^{-t/\tau_D}) \\ \tau_D = \frac{L_{BD}}{R_{batt} + R_{LBD}} \end{cases} \quad (2)$$

当发生线路故障时, 短路电流如公式(3)所示。

$$\begin{cases} i_D = i_B + i_{Bus} \\ E_{DC} - (R_{batt} + R_{LBD})i_D - L_{BD} \frac{di_D}{dt} - U_d = 0 \\ U_d - R_{eqF}i_B - L_{eqF} \frac{di_B}{dt} - 2R_{C_{Bus}}i_{Bus} - U_{C_{Bus}} = 0 \\ i_{Bus} = \frac{C_{Bus}}{2} \frac{dU_{C_{Bus}}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

由(2)解得:

$$\begin{cases} i_D = D_1 e^{-\tau_D t} + D_2 e^{-\tau_D t} \\ D_1 = i_{D0} \\ D_2 = i_{D0} \tau_D + \frac{E_{DC} - (2R_{C_{Bus}} + R_{eqF})i_{D0}}{L_{eqF}} \\ \tau_D = \frac{2R_{C_{Bus}} + R_{eqF}}{2L_{eqF}} \end{cases} \quad (4)$$

从结果可以看出，线路电抗的大小极大的影响了短路电流的特性。当线路电抗比较小时，母线故障时的短路电流和线路故障时的短路电流差别不大。从保护角度看，通过短路电流很难区分两种故障。

#### 4. 改进后的故障特征分析

如前所述，当系统发生母线故障和线路故障时，短路电流区分并不明显，考虑在线路出口处加装短路电抗器来区别母线故障和线路故障。图 4 表示加装短路电抗器后的系统图，当系统在线路出口处加装短路电抗器后，在正常运行时，电抗对直流电流没有影响，不会造成损耗。在线路发生短路故障时，一方面能够限制短路电流，另一方面相当于增加了线路长度，使得短路电流和母线故障时的短路电流有了区别，为保护提供了动作判据。

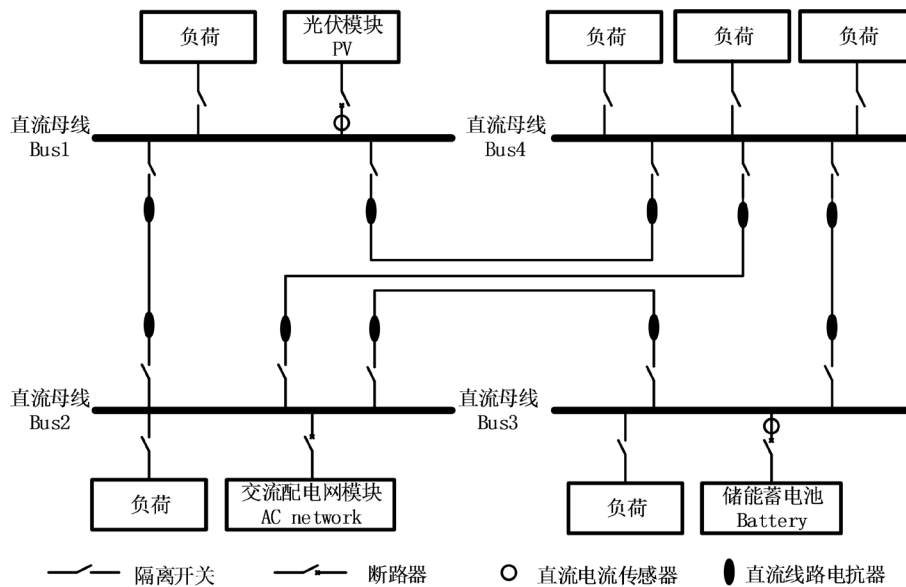


Figure 4. Structure of multi-terminal DC distribution system with short-circuit reactor installed  
图 4. 加装短路电抗器后的多端直流配电系统结构图

图 5 表示加装短路电抗器后从交流配电网整流器侧看的等效电路，其与不加装短路电抗器的区别在于，前者能够在线路发生短路时，弥补线路较短导致短路电流和母线故障时的短路电流区别不大的不足。其中， $L_{FR}$  和  $R_{FR}$  表示短路电抗器的等效参数。

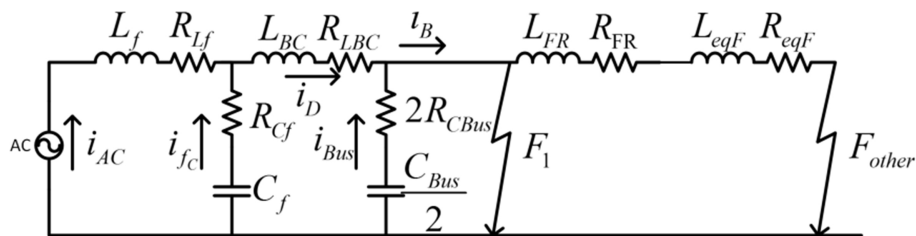


Figure 5. Equivalent circuit of short-circuit fault response on the side of AC distribution with short-circuit reactor installed  
图 5. 加装短路电抗器后短路故障反应在交流配电网侧的等效电路

图 6 表示加装短路电抗器后从储能蓄电池侧看的等效电路。同理可得，加装短路电抗器后，在储能蓄电池侧发生线路故障时，由于短路电抗器的存在，短路电流特征能够区别于母线故障。

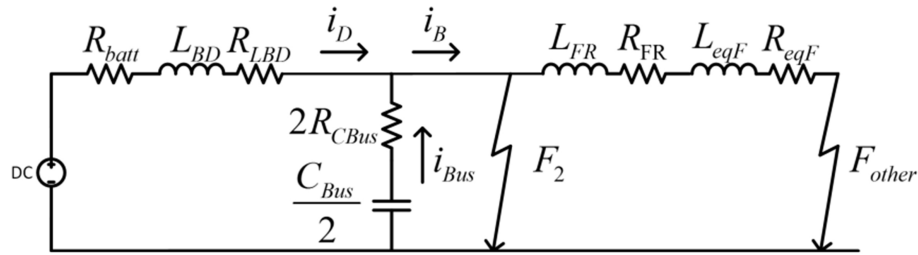


Figure 6. Equivalent circuit of short-circuit fault response on the side of energy storage with short-circuit reactor installed

图 6. 加装短路电抗器后短路故障反应在储能蓄电池侧的等效电路

加装短路电抗器后，短路电抗器的电抗值较大，可以明显增加短路电流的时间常数，使得短路电流的上升速度和下降速度都有明显的下降。

### 5. 仿真算例

基于前文的等效电路，建立 simulink 模型进行仿真。以储能蓄电池侧为例。在未加装短路电抗器时，发生母线正负极短路故障、线路出口处 5 米正负极短路故障和距离对侧母线 5 米正负极短路故障的短路电流如图 7 所示。F1 表示母线正负极发生金属性短路故障的短路电流曲线，F3-1 表示线路在出口 5 米处发生金属性短路故障的短路电流曲线，F3-2 表示线路在距离对侧母线 5 米处发生正负极短路故障的短路电流曲线。由图可知，母线故障和线路出口处故障的电流图形几乎重合，无法通过短路电流来区分母线故障和线路故障，不能够作为保护的判据使用。

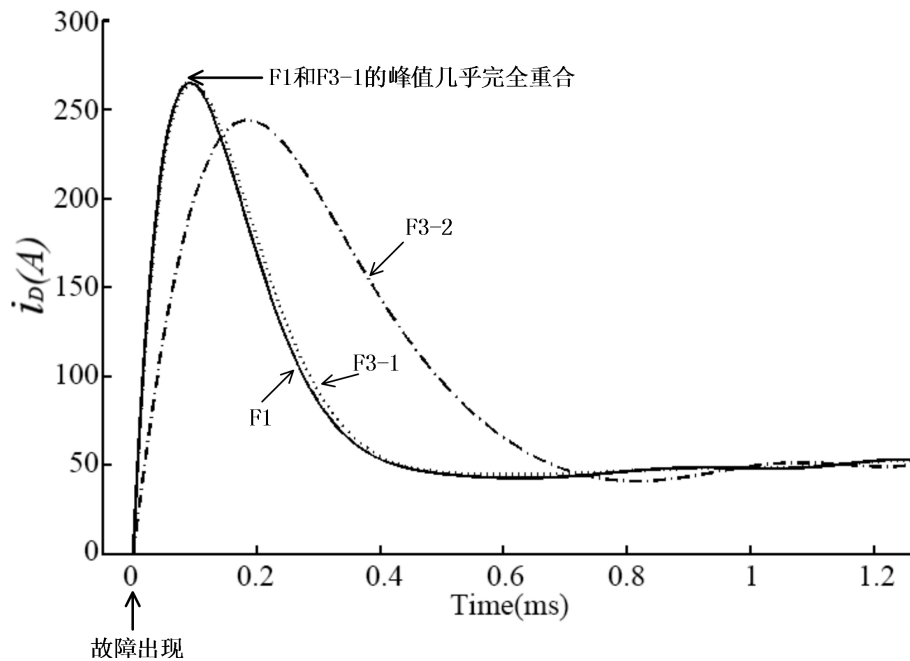
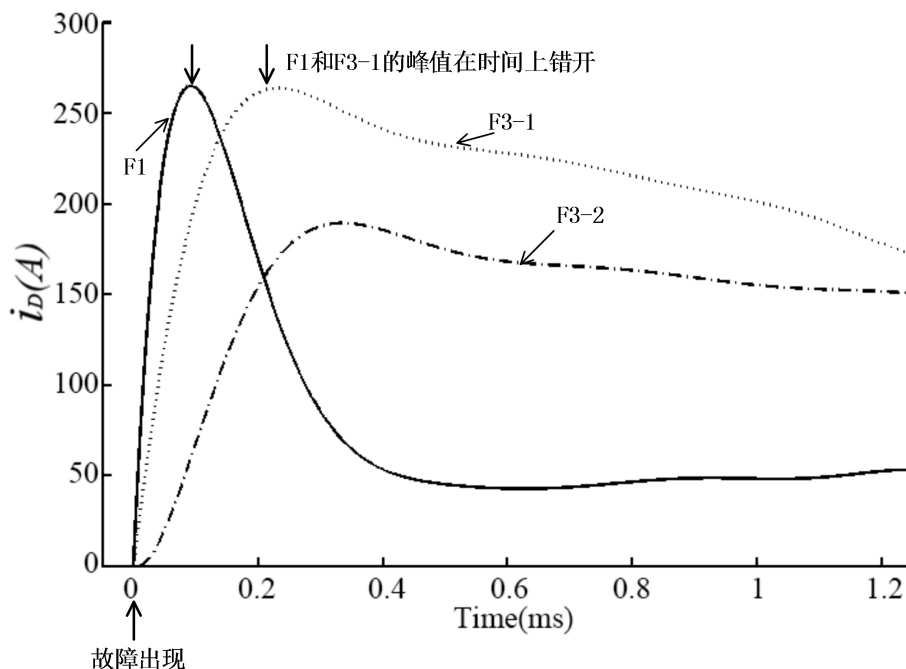


Figure 7. Short-circuit current curve without short-circuit reactor installed

图 7. 未加装短路电抗器的短路电流曲线图

图 8 表示加装短路电抗器后的短路电流曲线。F1 表示母线发生正负极金属性短路故障，F3-1 表示线路出口 5 米处发生正负极金属性短路故障，F3-2 表示线路在距离对侧母线 5 米处发生正负极金属性短路故障。从图中可以看出，F1 和 F3-1 二者波峰幅值相近，但在短路上升速度和下降速度上有差别。F3-2

的短路电流峰值较小，出现峰值的位置也更加靠后。据此，可以作为区分母线故障和线路故障的故障判据。然而，在线路出口处发生正负极金属性短路故障时，要区分毫秒级别的波峰对继电保护装置的采样要求很高，为了更好的区分这两类故障，考虑使用其微分特性进行故障判别。



**Figure 8.** Short-circuit current curve with different short-circuit reactor installed  
**图 8.** 加装不同短路电抗器的短路电流曲线图

由短路电流的特性可知，当线路发生短路故障时，由于电抗器的存在，图 9 中的 F3-1 和 F3-2 下降速度明显缓慢于 F1。即，线路故障的短路电流下降速度明显慢于母线短路故障，利用这一特性，考虑采用微分判据作为区别母线故障和线路故障的特征量。对 F1 和 F3-1 取时间的微分量后，得到如图 9 所示的微分量曲线，可以看到，母线故障的短路电流微分量的峰值出现在短路故障的瞬间，数量级达到  $10^4$ ；线路故障的短路电流微分量出现在 0.11 ms，数量级到达  $10^3$ 。前者不仅在时间和后者有区别，且峰值高于后者一个数量级，为保护提供了很好的动作判据。表 1 中记录加装电抗器前后的短路电流峰值和微分量峰值数据。数据表明，加装短路电抗器不会对母线的故障特征造成影响，而对线路故障特征有明显影响，从而将母线故障同线路故障区分开来。

**Table 1.** Comparison of short-circuit peak value and differential quantity with short-circuit reactor installed  
**表 1.** 加装短路电抗器前后短路电流峰值和微分量峰值比较表

故障类型	加装短路电抗器前		加装短路电抗器后	
	短路电流峰值(A) 出现时间(ms)	微分量峰值(A/ms) 出现时间(ms)	短路电流峰值(A) 出现时间(ms)	微分量峰值(A/ms) 出现时间(ms)
F1	265 0.09	$10^4$ 0.02	265 0.09	$10^4$ 0.02
F3-1	265 0.09	$10^4$ 0.02	262 0.25	$10^3$ 0.02
F3-2	248 0.23	--	239 0.33	--

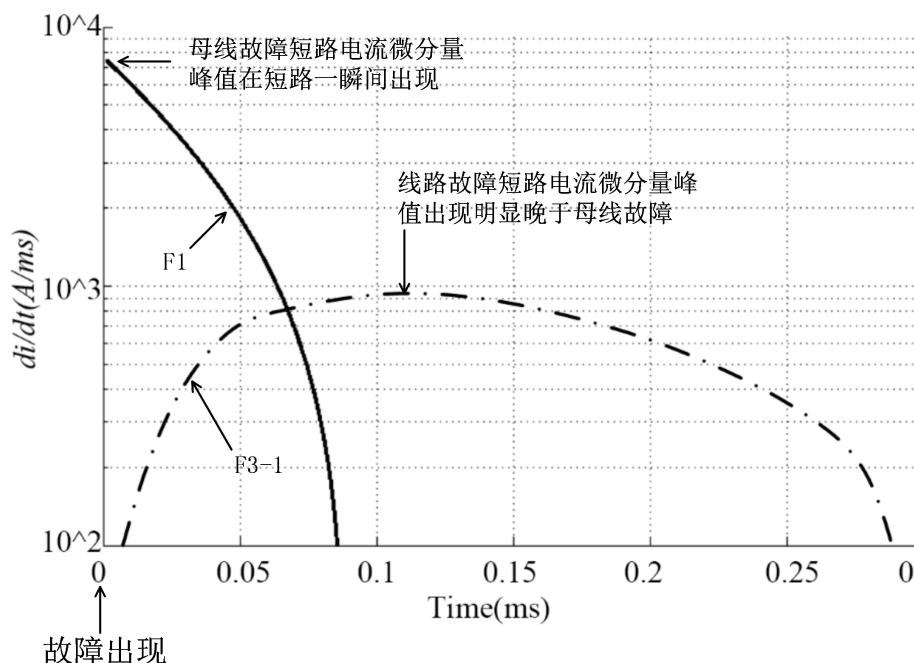


Figure 9. Short-circuit current differential quantity curve with short-circuit reactor installed  
图 9. 加装短路电抗器后的短路电流微分量曲线图

## 6. 结论

本文给出多端直流系统各种故障下的等效电路。在此基础上,分析其短路电流特征发现,母线故障和线路出口故障的短路电流曲线几乎重合,不能够作为动作保护判据。本文提出在线路出口处加装短路电抗器,改变线路故障时的短路电流特征,发现在加装短路电抗器后线路短路故障电流的幅值随电抗器的大小而变化,并且短路电流的变化速度明显小于未加装短路电抗器时的水平。因此,本文提出利用微分量来区别母线故障和线路故障。仿真结果表明,母线故障和线路故障的微分量相差一个数量级,满足作为保护动作判据的要求。

## 基金项目

中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172867)。

## 参考文献

- [1] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357.
- [2] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 殷正刚, 吴鸣, 孙丽敬, 张海. 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, 3358.
- [3] Farhadi, M., Mohamed, A. and Mohammed, O. (2013) Connectivity and Bidirectional Energy Transfer in DC Microgrid Featuring Different Voltage Characteristics. *Proceedings of the IEEE Green Technologies Conference*, Denver, 244-249. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2013.45>
- [4] Salomonsson, D., Soder, L. and Sannino, A. (2009) Protection of Low-Voltage DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24, 1045-1053. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2016622>
- [5] 朱建萍, 周建萍, 时珊珊, 等. 光伏发电接入直流配电网 DC-DC 变换器的仿真研究[J]. 广东电力, 2015, 30(2): 20-24, 33.
- [6] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.
- [7] 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.



- [8] 徐通, 王育飞, 张宇, 等. 直流配电网发展现状与应用前景分析[J]. 华东电力, 2014, 42(6): 1069-1074.
- [9] 范明天, 惠慧. 国外直流配电系统的理论分析方法与应用实践[J]. 供用电, 2014(7): 36-43.
- [10] Stieneker, M., Butz, J., Rabiee, S., *et al.* (2015) Medium-Voltage DC Research Grid Aachen. *Proceedings of Die Energiewende-Blueprints for the New Energy Age*, International ETG Congress, Bonn, 1-7.
- [11] De Doncker, R.W. (2011) Design Aspects of a Medium-Voltage Direct Current (MVDC) Grid for a University Campus. *Proceedings of the 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*, Jeju, 2359-2366.
- [12] Zhao, B., Song, Q. and Liu, W.H. (2013) Efficiency Characterization and Optimization of Isolated Bidirectional DC-DC Converter Based on Dual-Phase-Shift Control for DC Distribution Application. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **28**, 1711-1727. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2210563>
- [13] 韩民晓, 王皓界. 直流微电网——未来供用电领域的重要模式[J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 1-9.
- [14] Salonen, P., Kaipia, T., Nuutinen, P., *et al.* (2008) An LVDC Distribution System Concept. *Proceedings of the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Helsinki, 1-7.
- [15] Nilsson, D. and Sannino, A. (2004) Load Modelling for Steady-State and Transient Analysis of Low-Voltage dc Systems. *Proceedings of the 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference*, Seattle, 774-780.

#### 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: 2161-8763, 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: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)