

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.021

# 低压柔性直流微电网的电流互感器应用分析

张明瀚, 陆子凯

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 低压柔性直流微电网是沟通储能、电动汽车等直流设备与中压直流配电网的桥梁。随着直流技术发展及越来越多直流设备接入电网, 发展低压柔性直流微电网具有可行性、必要性。直流电流互感器是低压柔性直流微电网的重要组成部分。[方法] 分析了典型的低压柔性直流微电网应用场景, 对比了直流电流互感器, 从可靠性、经济性角度分析了直流电流互感器的选型。[结果] 该应用场景下精度要求高的支路保护、控制独立配置电流互感器, 精度要求低的支路保护、控制共用电流互感器, 当前技术水平下, 推荐使用电阻分流器或巨磁电阻效应传感器。[结论] 提出的当前低压直流电流互感器选型、应用分析是正确并有效的, 同时也为其他应用场景提供了选型、配置建议。**关键词:** 低压柔性直流微电网; 直流电流互感器; 选型; 配置方案

中图分类号: TM7; TM933.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)04-0131-06

## Analysis of the Application of Current Transformer in Low-voltage Flexible DC Microgrid

ZHANG Minghan, LU Zikai

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

**Abstract:** [Introduction] Low voltage flexible DC microgrid is a bridge between DC devices such as energy storage, electric car and mid-voltage DC power grid. As the DC technology develops and many more DC devices connecting to the grid, it's feasible and necessary to develop low voltage flexible DC microgrid. DC current transformer is a chief component of low voltage flexible DC microgrid. [Method] This article analyzed typical application scenario of low voltage flexible DC microgrid and compared several types of DC current transformer. It analyzed the reliability and economy of DC current transformer. [Result] Under specified circumstance, for branches of higher requirements of precision, DC current transformer is equipped independently for protection and control, while for branches of low requirements DC current transformer is shared between protection and control. Under current technical level, it's recommended to use resistor shunt or giant magnetoresistance sensors. [Conclusion] It's proved that under current technical level, the analysis this article mentioned is correct and effective. This article also gives advice for application under other scenarios.

**Key words:** low voltage flexible DC microgrid; DC current transformer; type selection; configuration plan

近年来, 能源互联网技术正席卷而来。可再生能源、分布式发电、智能电网、直流输电、储能、电动汽车等新能源技术与物联网、大数据、移动互联网等信息技术的发展, 为能源互联网技术的发展奠定了坚实基础。

低压柔性直流微电网是沟通储能、电动汽车、

分布式能源等直流特性设备与中压直流配电网之间的桥梁, 是能源互联网技术的重要组成部分。随着低压柔性直流技术的发展及越来越多直流设备接入, 柔性直流微电网的发展具有必要性、紧迫性。柔性直流微电网具有供电容量大、电能质量高、传输效率高、供电可靠性高、方便清洁能源便捷接入等优点, 目前已成为柔性直流技术领域的重点发展方向。国内外已建成数个示范工程<sup>[1]</sup>, 对技术发展起到了极大的推进作用。

直流电流互感器是构成低压柔性直流微电网的必备环节。它承担着直流电能计量、电网控制与保

收稿日期: 2019-03-16 修回日期: 2019-06-16

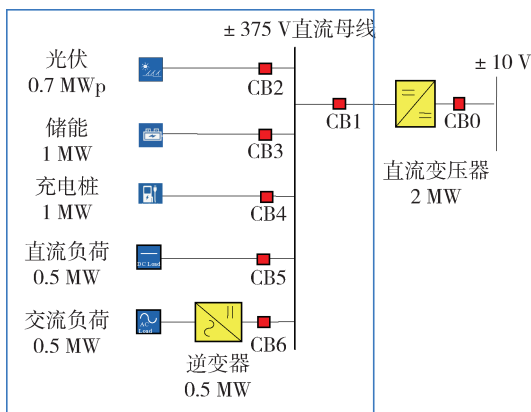
基金项目: 中国能建广东院科技项目“中低压柔性直流电网关键技术研究”(EV04421W)

护等重要作用。低压直流互感器普遍需要供电回路,其技术比同电压等级交流互感器复杂,制造难度大,且目前应用场景少,采购成本较高。由于柔性直流微电网直接面对用户,用户基数大,未来应用规模大,选择满足场景要求且造价低廉的直流电流互感器对提高工程质量、降低柔性直流微电网整体工程造价具有重要意义。本文分析了目前直流互感器产品发展现状,提出了适用于应用场景的方案,并为类似应用场景提供了建议。

## 1 低压柔性直流微电网典型应用场景分析

### 1.1 典型应用场景概述

某科技园区内构建一个  $\pm 375\text{ V}$  柔性直流微电网。为满足园区用户需求,微电网中配置总容量  $0.96\text{ MW}$  电动汽车快速直流充电桩,包括 12 台  $60\text{ kW}$  小车用直流充电桩,2 台  $120\text{ kW}$  (一机双枪) 大巴用直流充电桩。园区负荷为  $1\text{ MW}$ , 含直流负荷  $0.5\text{ MW}$  (除直流充电桩以外) 和直流逆变供电的交流负荷为  $0.5\text{ MW}$ ; 园区屋顶空间建立  $700\text{ kWp}$  分布式光伏发电系统,为园区负荷提供部分清洁电力供应; 园区配置  $1\text{ MW}/1\text{ MWh}$  电化学储能系统,解决单直流母线供电可靠性和光伏发电存在的输出功率波动问题,保障园区单直流母线负荷第二路可靠独立电源支撑、支持园区快速充电桩运行、帮助消纳光伏、实现削峰填谷以及直流配电网故障时,直流微电网的孤岛运行。结合上述园区供电要求,建设了  $\pm 375\text{ V}$  柔性直流微电网,其拓扑结构示意图如图 1 所示。



园区直流微电网

注: ■ 为直流断路器。

图 1 典型柔性直流微电网拓扑结构

Fig. 1 Topology of typical flexible DC microgrid

直流微电网采用单母线接线型式,直流变压器 ( $2\text{ MW}$ ) 将中压  $\pm 10\text{ kV}$  直流配网降至低压  $\pm 375\text{ V}$  接入直流微电网直流母线。直流母线分别连接  $0.7\text{ MWp}$  光伏系统、 $1\text{ MW}/1\text{ MWh}$  电化学储能系统、 $1\text{ MW}$  电动汽车直流充电桩、 $0.5\text{ MW}$  直流负荷、经 DC/AC 逆变器接入  $0.5\text{ MW}$  交流负荷等分支,各分支配置低压直流断路器及低压直流电流互感器。

### 1.2 典型应用场景工况分析

柔性直流微电网各支路的额定电流及最小运行方式如表 1 所示。

表 1 各支路额定电流及最小运行方式

Tab. 1 Rated current and minimum current of each branch

支路名称	额定电流/A	最小运行方式
直流变低压侧	267.0	0.1 pu
储能	133.0	0.1 pu
光伏	930	0.1 pu
充电桩	133.0	0.1 pu
直流负荷	670	0.1 pu
交流负荷	670	0.1 pu

考虑以下典型运行状况: 充电桩实时功率为  $0.5\text{ MW}$ , 直流负荷实时功率为  $0.5\text{ MW}$ ; 交流负荷实时功率为  $0.5\text{ MW}$ ; 光伏发电系统输出功率为  $0.5\text{ MW}$ , 储能系统充放电功率为  $0.5\text{ MW}$ , 直流变压器稳态功率为  $1\text{ MW}$ 。

在仿真软件中搭建直流微电网仿真测试模型<sup>[11]</sup>。仿真测试考虑在典型运行状况下发生最严重的故障情况,即各端口  $\pm 375\text{ V}$  侧极间短路故障,短路电阻为  $10\text{ m}\Omega$ 。仿真计算结果如表 2 所示:

从上述仿真结果,可得出低压直流电流互感器的选型要求:

1) 因直流设备均可在最小运行点 ( $0.1\text{ p.u}$ ) 到额定电流 ( $1.34\text{ p.u}$ ) 范围内运行,区间内应实现对直流设备的控制。直流变压器和储能设备具有定电流控制功能,应满足定电流控制对电流互感器的要求: 最小运行点 ( $0.1\text{ p.u}$ ) 到额定 ( $1.34\text{ p.u}$ ) 电流互感器精度不低于  $0.2\%$ 。

2) 各支路极间故障时,最大短路电流为  $11.42\text{ kA}$ ,为该支路额定电流的 20 倍。因此,应保证此情况下直流电流互感器不饱和,避免保护误动。

3) 电流互感器应有足够快的响应速度,避免延

表2 各端口极间短路时各支路短路电流

Tab. 2 Short-circuit current of each branch under terminal short circuit

kA

短路发生位置	直流变低压侧支路	光伏支路	充电桩支路	储能支路	直流负荷支路	交流负荷支路
直流变 ±375 V 侧极间	7.33	2.42	0	3.21	0	1.6
光伏出口处极间	4.21	10.79	0	3.78	0	2.0
充电桩出口处极间	4.19	2.45	11.42	3.66	0	1.4
储能出口处极间	4.22	2.56	0	8.78	0	2.2
±375 V 母线极间短路	4.29	2.31	0	2.31	0	1.6
直流负荷出口处极间	4.23	2.41	0	3.24	11.22	1.9
交流负荷出口极间	4.23	2.54	0	3.17	0	9.8

时造成保护误动。

4) 应用场景为低电压等级直流开关柜, 造价应在合理范围内。

根据上述要求, 展开了直流电流互感器的选型。

## 2 低压直流电流互感器选型分析

本文考虑目前电流互感器产业化现状, 选取在高压直流工程中使用过的全光纤互感器、电阻分流器、巨磁电阻效应传感器和零磁通型霍尔电流互感器为比较对象, 对其原理进行分析, 对各种电流互感器参数进行比较, 得出低压直流互感器选型依据。

### 2.1 原理分析

#### 2.1.1 全光纤互感器

全光纤互感器测得电流周边磁场强度的线积分, 因磁场强度正比于电流大小, 可测得电流大小, 其基本原理是安培环路定理及法拉第磁光效应<sup>[2-3]</sup>。全光纤互感器目前应用于特高压直流工程的极线电流测量。互感器内的光源、光纤、分束器、光学调制器、电子元器件等设备易受环境温度影响, 制造工艺要求高; 且该互感器用量较少, 导致目前全光纤互感器造价高。全光纤互感器原理图如图2所示。

全光纤互感器包括激光发生装置、光纤传感器件、光信号处理系统等3部分。激光发生装置产生光信号; 光纤传感元件将导体周围的磁场强度转换为两束相干光的相位差; 光信号处理系统实现将光信号转换为电信号, 并实现信号的调制与解调, 计

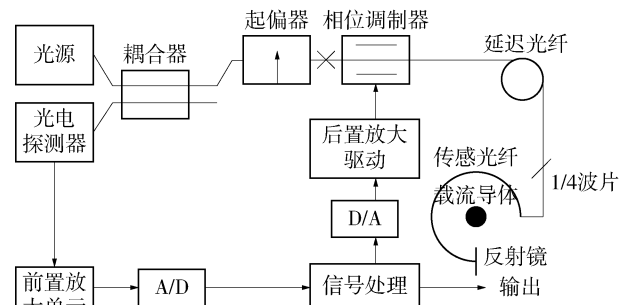


图2 全光纤互感器原理图

Fig. 2 Illustrative diagram of all-fiber CT

算出测量电流。

全光纤互感器需要供能回路, 目前激光供能回路可靠性较低, 已有特高压直流全光纤互感器的可靠性受制于激光供能回路可靠性。

全光纤传感器不存在其他类型互感器电阻发热、铁芯饱和等问题, 测量范围较大, 测量精度较高。

#### 2.1.2 电阻分流器

电阻分流器由锰镍铜合金四端电阻构成, 电阻有2个电流端子和2个电压测量端子<sup>[4-6]</sup>。一次电流流入电流端子, 已知电阻阻值, 测得电压测量端子的电压降即可得电流值。电阻分流器目前应用于测量特高压直流工程的极线电流, 因制造工艺比全光纤互感器简单, 且用量较大, 其造价低于全光纤互感器。

电阻分流器串联在回路中, 一次侧测出直流电流值, 信号经过处理、转换后通过光纤接至合并单元, 合并单元通过光纤向一次侧供能。电阻分流器测量原理如图3所示。

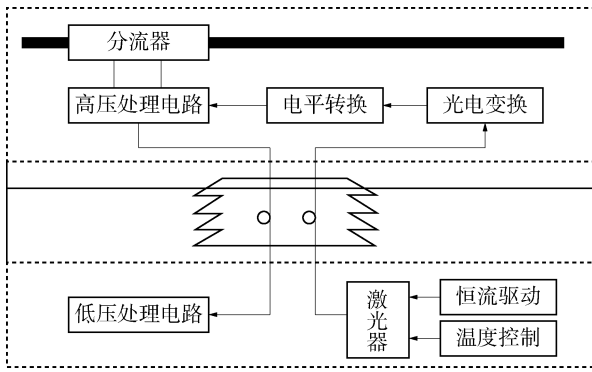


图3 电阻分流器电流互感器原理图

Fig. 3 Illustrative diagram of resistor diverter CT

电阻分流器需要供能回路，目前激光供能回路可靠性较低，已有特高压直流工程中，电阻分流器互感器的可靠性受制于激光供能回路可靠性。

电阻分流器由锰铜合金电阻制成，须工作在最佳温度范围内。如大电流通过电阻，温升使测量精度降低，故电阻分流器在大电流时精度降低，最大测量范围设定为 6 p. u。

### 2.1.3 巨磁电阻效应传感器

物质在一定磁场下电阻改变的现象，称为“磁阻效应”，在某种条件下，电阻率在磁场作用下，比通常磁性金属与合金材料的磁电阻值减少幅度高 10 余倍的现象，称为“巨磁阻效应”(TMR)<sup>[7]</sup>。巨磁电阻效应传感器原理如图 4 所示。

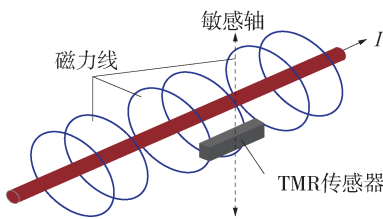


图4 巨磁电阻效应传感器原理图 1

Fig. 4 Illustrative diagram 1 of TMR CT

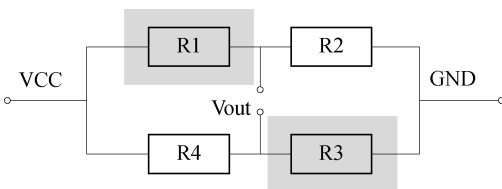


图5 巨磁电阻效应传感器原理图 2

Fig. 5 Illustrative diagram 2 of TMR CT

电流流过导体时，导体周围的磁场大小正比于导线中电流大小。如图 5 所示，利用四个 TMR 电阻组成一个惠斯通电桥结构，其中电阻 R1、R3 被

NiFe 材料屏蔽，不能感应到磁场的变化，电阻 R2、R4 未被屏蔽。在外磁场的作用下，被屏蔽的 R1、R3 阻值不发生变化，而未被屏蔽的 R2、R4 阻值发生改变，使得电桥输出发生变化，电桥的输出结果反映了外磁场的大小，从而反应了母线电流的大小。巨磁电阻效应传感器目前应用于配网柔性直流系统中。巨磁电阻效应传感器需要激光供能回路。

巨磁电阻效应传感器由电阻制成，须工作在最佳温度范围内。如大电流通过电阻，温升使测量精度降低，故巨磁电阻效应传感器在大电流时精度降低，最大测量范围设定为 6 p. u。

### 2.1.4 零磁通型霍尔电流互感器

零磁通型霍尔电流互感器的基本原理是基于完全的磁通势平衡，其原理图如图 6 所示。J 为检测绕组，J 为动态检测单元，K 产生自平衡调整电流。回路的磁势平衡方程为

$$I_0 N_0 + I_1 N_1 + I_J N_J = -I_0' N_0 \quad (1)$$

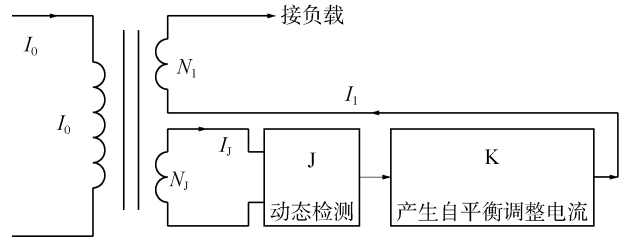


图6 零磁通型霍尔电流互感器原理图

Fig. 6 Illustrative diagram of zero-flux Hoare CT

$I_0$  为一次侧电流，其励磁磁势在  $N_1$  两端产生感应电压，动态检测单元 J 检测到  $N_1$  两端感应电压，通过 K 产生自平衡调整电流  $I_1$ ，供给  $N_1$  绕组； $I_1$  产生与  $I_0$  相反的磁通，达到磁势平衡<sup>[8-9]</sup>。最终电流  $I_1$  全部由 K 供给。J 随时动态检测  $N_1$  两端电压，当电压差足够小时，铁芯中的磁通为零磁通。如果检测值偏离允许值，K 高速调整，使得铁芯始终保持在零磁通状态，此时传感器精度较高。

零磁通型霍尔电流互感器目前用于特高压直流项目中性线电流测量，因技术成熟且不需要激光供能回路，其造价水平最低。

零磁通霍尔电流互感器通过大电流使铁芯饱和，最大不饱和电流低于其他类型传感器，受制于闭环传感原理，测量精度低于其他类型传感器。

## 2.2 直流电流互感器参数比较

直流电流互感器的参数比较如表 3 所示。

## 2.3 典型场景电流互感器应用分析

对比2.2节列举的直流电流互感器, 可得到如下分析:

1) 全光纤互感器能同时满足最小运行点的测量精度、最大不饱和电流范围的要求。但是全光纤互感器工艺复杂、用量较少, 导致其造价较高, 且无现成的 $\pm 375\text{ V}$ 产品, 不适用于本文提出的应用场景。

2) 零磁通型霍尔电流互感器精度低于0.2, 且无法承受大于5倍电流冲击, 不适用于本文提出的应用场景, 可应用于最小运行点至额定电流范围内测量精度要求不高, 或短路电流不大的场景。

3) 电阻分流器和磁电阻效应传感器均无法同时满足小电流精度和最大不饱和电流范围的要求。

基于3, 首先以满足最大故障电流不饱和为原则选择电流互感器。

由于直流变压器、储能设备具备(0.1 p.u) ~ (1.34 p.u)范围内定电流运行方式, 要求直流变压器低压侧端口、储能支路的储能换流器端口的电流互感器精度为0.2%, 但不能同时满足最大故障电流不饱和和足最小运行点(0.1 p.u)的精度要求。因此, 这2个支路配置专用于控制的电流互感器, 以满足最小运行点(0.1 p.u)到额定运行点(1.34 p.u)之间控制精度要求。电阻分流器和磁电阻效应传感器均可抗大电流冲击, 在短路状态下不会因大电流冲击造成损坏。

因此, 针对本文提出的应用场景, 选择电阻分流器或磁电阻效应传感器为电流测量器件。对于在最小运行点(0.1 p.u)到额定运行点(1.34 p.u)之

间控制精度要求高的支路, 如直流变压器低压侧、储能支路, 保护和各自配置独立的电流互感器; 以同时满足满足小电流控制精度和最大不饱和电流范围的要求; 对于控制精度要求低的支路, 保护和共用电流互感器, 此电流互感器应满足最大不饱和电流范围。

## 3 结论

本文以现有电流互感器产业化现状为基础, 结合应用场景进行分析, 得出如下结论:

1) 本文的应用场景中最大短路电流为额定电流的20倍, 最小运行电流为额定电流的1/10, 直流变压器和储能装置有定电流控制要求, 控制精度要求高。因此, 选择电阻分流器或磁电阻效应传感器为电流测量器件; 对于直流变压器、储能等短路电流水平高、控制精度要求高的支路, 安装2个电流互感器, 保护和各自使用1个电流互感器; 对于短路电流水平高、控制精度要求低的支路, 只装设1个电流互感器, 保护和共用。

2) 对于最小运行点至额定电流范围内测量精度要求不高, 或短路电流不大的低压柔性直流微电网应用场景, 可使用零磁通霍尔电流互感器, 可降低工程造价。同时霍尔器件不需激光供能回路, 可提高电流互感器运行可靠性。

3) 因光伏、储能、电动汽车等用户侧设备均呈现直流特性, 如未来适用范围增大, 可选择全光纤互感器进行量产, 满足工程要求的同时可大幅降低造价。

表3 直流电流互感器的参数比较

Tab. 3 Comparison between several DC current transformer

参数	全光纤	电阻分流器	磁电阻效应	零磁通型霍尔电流互感器
精度	0.2%	0.1 Id. ~ 1.34 Id < 0.5% 1.34 Id. ~ 3 Id < 1.5% 3 Id. ~ 6 Id < 10%	0.1 Id. ~ 1.34 Id < 0.2% 1.34 Id. ~ 3 Id < 1.5% 3 Id. ~ 6 Id < 3%	0.5
最大不饱和电流	30 p.u	6 p.u	6 p.u	1.5 p.u
延时	10 $\mu\text{s}$	400 $\mu\text{s}$	50 $\mu\text{s}$	1 $\mu\text{s}$
造价	高	中等	中等	低
$\pm 375\text{ V}$ 产品化	无	有	有	有
需激光供能	√	√	√	×
大电流冲击	允许	允许	允许	无法承受大于5倍冲击

## 参考文献:

- [1] 曾嵘, 赵宇明, 赵彪, 等. 直流配用电关键技术研究与应用展望 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6791-6801.  
ZENG R, ZHAO Y M, ZHAO B, et al. A Prospective look on research and application of DC power distribution technology [J]. Proceedings of The CSEE, 2018, 38(23): 6791-6801.
- [2] 樊占峰, 白申义, 杨智德, 等. 光学电流互感器关键技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 41-44.  
FAN Z F, BAI S Y, YANG Z D, et al. Research on key technology of optical current transformer [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 41-44.
- [3] 杨汉瑞, 杨燕, 尚思飞, 等. 全光纤电流互感器的研究现状 [J]. 东北电力大学学报, 2017, 37(3): 90-96.  
YANG H R, YANG Y, SHANG S F, et al. Present research situation of all-fiber-optical current transformer [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2017, 37(3): 90-96.
- [4] 杨雯, 杨奖利, 侯彦杰, 等.  $\pm 800$  kV 直流电子式电流互感器的研制 [J]. 高压电器, 2011, 47(1): 10-17.  
YANG W, YANG J L, HOU Y J, et al. Development of  $\pm 800$  kV DC electronic current transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(1): 10-17.
- [5] 费焯, 王晓琪, 罗纯坚, 等.  $\pm 1\ 000$  kV 特高压直流电流互感器选型及结构设计 [J]. 高压电器, 2012, 48(1): 7-12+16.  
FEI Y, WANG X Q, LUO C J, et al. Type selection and structure of  $\pm 1\ 000$  kV Ultra HVDC instrument transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 7-12+16.
- [6] 罗苏南, 曹冬明, 须雷, 等. 500 kV 直流电子式电流互感器及其应用 [J]. 电工电气, 2013, 09(1): 41-44.  
LUO S N, CAO D M, XU L, et al. 500 kV DC electronic current transformer and its application [J]. Electrotechnics Electric, 2013, 09(1): 41-44.
- [7] 钱政, 任雪蕊, 刘少宇. 巨磁电阻直流电子式电流互感器的研制 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 71-75.  
QIAN Z, REN X R, LIU S Y. A DC electronic current transformer based on the giant magneto-resistance effect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 71-75.
- [8] 王文, 齐伶俐, 乔记平, 等. 基于零磁通原理的微电流传感器的研究 [J]. 仪表技术与传感器, 2018, 03(1): 23-26+29.  
WANG W, LIN L Y, QIAO J P, et al. Research on micro

current sensor based on zero flux principle [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018, 03(1): 23-26+29.

[9] LEM. Current Transducer IN 2000—S 说明书 [R/OL]. (2017-06-29) [2019-06-16]. [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/in\\_2000-s\\_ultrastab.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/in_2000-s_ultrastab.pdf).

## 项目简介:

**项目名称** 中低压柔性直流电网关键技术研究(EV04421W)

**承担单位** 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司柔性输电技术中心

**项目概述** 中低压柔性直流配电技术具有节约输电走廊、适应分布式电源接入、提高敏感负荷供电质量等优势, 本项目通过研究, 全面掌握柔性直流配电系统的关键技术, 提出不同应用场景下直流配电网的拓扑结构、相应的电气主接线、设备选型及控制保护技术等。

**主要创新点** (1)研究几种典型应用场合下, 中低压柔性交直流混合电网适用的拓扑结构及电压等级; (2)研究中低压柔性直流电网推荐采用的电气主接线方案及主回路参数; (3)提出中低压柔性直流电网的绝缘配合方法及避雷器配置方案; (4)研究各种电压等级及容量的换流器、直流变压器及直流断路器的选型方案; (5)研究适用于直流中低压电网的系统控制策略, 实现系统内分布式电源、储能装置、用电负荷和各换流站的协调控制, 实现优质可靠供电; (6)研究中低压柔性交直流电网联合运行的控制策略。

## 作者简介:

**张明瀚**(通信作者)

1990-, 男, 广东广州人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司工程师, 宾夕法尼亚大学电气工程专业硕士, 主要从事变电站、换流站电气一次设计工作 (e-mail) zhangminghan@gedi.com.cn。



ZHANG M H

## 陆子凯

1992-, 男, 广东广州人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司工程师, 曼彻斯特大学电气工程专业硕士, 主要从事变电站、换流站电气一次设计工作 (e-mail) luzikai@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)