

交流滤波器 C1 电容器保护配合策略研究

李建勋, 吴贻志, 李豹

(中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405)

摘要: 以南方电网各工程采用的交流滤波器 C1 电容器保护配合策略及运行情况为研究对象, 对三种不平衡保护原理的优劣进行分析, 指出当前计数法不平衡保护原理中存在的动作灵敏性、准确性的缺陷。综合比值法、桥差法和脉冲法的原理, 提出了改进脉冲不平衡保护计数定值的建议, 并首次提出了多段位计数的方法。基于一些特殊运行情况, 提出了与桥差保护的配合思路。

关键词: 交流滤波器; 电容器; 不平衡保护

Study on the coordination strategy of the C1 capacitor protection of AC filter

LI Jian-xun, WU Yi-zhi, LI Bao

(Guangzhou Bureau, EHV Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The coordination strategy and operation condition of the C1 capacitor protection of AC filter used in HVDC systems of CSG are analyzed. The advantages and disadvantages of the three unbalance protection principles are studied. The paper points out the defects in the sensitivity and reliability of the present unbalanced protection principle using the counting method. Combining the ratio method, bridge differential method and pulse method, the paper proposes to improve the fixed value of pulse unbalance counting protection and first puts forward the multi-grade counting method. The coordination with the bridge differential protection is proposed based on the special operation status.

Key words: AC filter; capacitor; unbalance current protection

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0139-06

0 引言

C1电容器是高压换流站交流滤波器的重要组成部分, 其可靠运行直接关系到直流输电系统的安全稳定。当一个电容器元件发生故障时, 剩余完好元件承受的电压升高, 有可能引起新的元件击穿, 导致其余元件上的电压继续升高, 产生恶性连锁效果, 最终导致一支电容器贯穿性短路, 这种故障电容器单元对完好单元造成过应力致使电容器损坏的现象叫做电容器的雪崩效应。及时检测电容器内部元件损坏情况是交流滤波器保护的重要内容之一^[1-3]。

1 C1 电容器故障后过电压分析

C1 电容器由多个单只电容器串并联构成, 单只电容器内部也是由一定数目的元件串并联构成, 如图 1 所示。当单只电容器内部元件发生了故障时, 其所串联的内熔丝动作将故障元件切除, 从而使电容器能够维持运行, 同时在 C1 电容器桥臂上产生

不平衡电流^[4]。

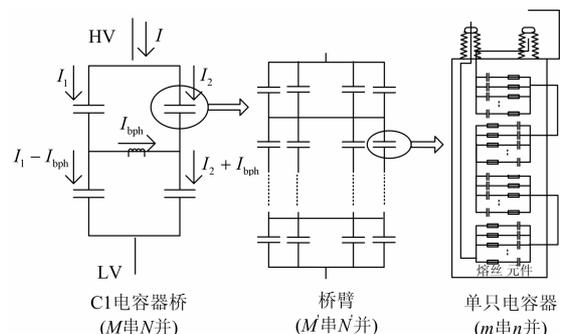


图 1 电容器接线图

Fig. 1 Capacitor wiring

不平衡电流 I_0 的大小与电容器单元的串并联数 MN 、电容器单元内部的元件串并联数 mn 、故障隔离的元件数 k 和额定电流 I_E 有关系。

$$I_0 = \frac{kI_E}{MNmn - k(MNn - MN + 2N - 3)} \quad (1)$$

内熔丝隔离故障元件将导致剩余完好元件的电压发生变化, 由于对元件的过电压倍数有一定的限制, 因此故障隔离的元件数 k 是受到元件过电压倍数 K_v 的限制。

$$k = \frac{MNmn(K_v - 1)}{K_v(MNn - MN + 2N - 3)} \quad (2)$$

以±500 kV 宝换流站实际运行的 C 型交流滤波器为例, 其 C1 电容器组为 48 串 4 并结构, 单支电容器内部元件为 4 串 14 并, 正常运行时额定相电流 I_E 为 190 A, 根据式(1)和式(2)可以计算出内熔丝损坏 1~10 个元件的时候, 不平衡电流值、元件过电压倍数和单元过电压倍数的列表, 如表 1 所示。

表 1 故障元件引起的过电压和不平衡电流

Table 1 Over-voltage and unbalanced current caused by

faulty components			
故障元件数	故障段元件 电压/%	故障电容 电压/%	不平衡 电流值/mA
0	100	100	0
1	1.06	1.01	22
2	1.14	1.02	47
3	1.23	1.03	76
4	1.33	1.04	110
5	1.45	1.06	149
6	1.59	1.08	197
7	1.77	1.10	255
8	1.99	1.14	328
9	2.27	1.17	421
10	2.65	1.23	545

可以看出, 随着故障元件数目的增多, 故障段元件和电容承受的过电压增大, 不平衡电流也随之增大, 当故障元件达到一定程度时, 由于元件无法承受过电压而使得电容器发生严重损坏, 保护必须采取合适的动作策略确保电容器及时退出运行。

实际工程中通常采用不平衡保护来检测电容器的内部故障。对比国内直流工程主要采用的西门子和 ABB 的保护配置, 其原理大体相同, 实现方法分为桥差过流法、比值不平衡法和脉冲不平衡计数法^[5]。

2 C1 不平衡保护原理分析

交流滤波器有多种不同的接线方式, 但 C1 电容器结构基本相同, 一般有四个电容桥臂构成 H 桥^[6], 如图 2 所示。其中 T2 为不平衡电流测量 CT, T1、T3 为穿越电流测量 CT。

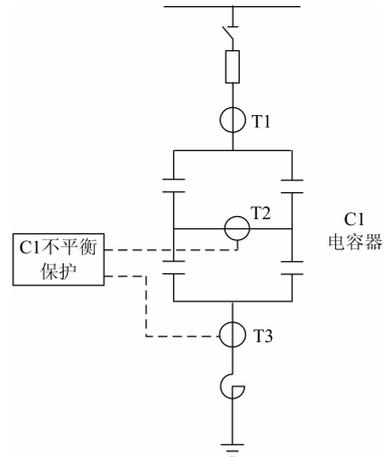


图 2 保护接线图

Fig. 2 Protection wiring

2.1 桥差过流法

根据交流滤波器电容器的 H 型接线方式, 如果某个电容器单元中的元件击穿或熔丝熔断, 该桥臂的电容将发生变化, 导致桥中流过不平衡电流。因此, 通过监视如图 2 中电流互感器 T2 流过的电流, 便可以判断电容器的运行情况。

由于电容器的制造偏差, 正常工况下, 图 2 中电流互感器 T2 也将流过一定的不平衡电流, 为了避免对保护功能造成影响, 需要在滤波器第一次充电或在更换电容器之后对不平衡电流进行校正。当校正后的不平衡电流大于设定的门槛值时, 退出相应交流滤波器。保护判据为

$$I_{CT2校正} > I_{set}$$

其中: $I_{CT2校正}$ 为校正后的 C1 不平衡电流; I_{set} 为保护定值。

采用上述补偿原理的电容器桥差过流保护有效消除稳态运行时不平衡电流对保护的干扰。但是由于交直流系统的固有特性, 例如在换流站近区交流系统故障、交流系统电压及频率发生波动或直流系统输送功率发生变化时, 都有可能引起不平衡电流的变化, 对保护准确动作造成影响, 在设定定值时需要根据系统的变化情况找出元件故障后不平衡电流的变化范围, 并且为了防止桥差过流保护的误动, 往往需要牺牲其动作精度, 实际工程当中桥差过流保护一般做为后备保护。

2.2 比值不平衡法

当一个桥臂发生电容器故障后, 不平衡电流与穿越电流的比值仅与故障元件的个数及原有电容器元件的串并联方式相关, 可以采用不平衡保护电流

与穿越电流的比值作为保护判据, 根据单一元件耐受电压水平, 确定损坏元件的个数, 通过损坏元件个数确定比值作为保护动作定值, 根据相应元件在该过电压水平下的耐受时间确定保护动作延时, 这样可以保证定值的设定不受交直流系统状态改变引起穿越电流变化的影响, 确保不平衡保护在各种工况下均能准确动作。其适用性验证方法如下。

设单个桥臂的电容器元件为 M' 并、 N' 串, 每一个电容器元件的电容为 C , 内部结构如图 1。则单个桥臂的电容为 $C_{好} = \frac{M'C}{N'}$, 如果有一个电容器元件损坏, 故障桥臂电容为

$$C_{故} = \frac{\frac{M'C}{N'-1}(M'-1)C}{\frac{M'C}{N'-1} + (M'-1)C} = \frac{M'(M'-1)C}{M' + (M'-1)(N'-1)}$$

$$I_1 = \frac{C_{好}}{C_{好} + C_{故}} I \quad I_2 = \frac{C_{故}}{C_{好} + C_{故}} I$$

$$I_{bph} = \frac{I_1 - I_2}{2} = \frac{C_{好} - C_{故}}{2(C_{好} + C_{故})} I$$

即时偏差为

$$\left| \frac{I_{bph}}{I} \right| = \frac{C_{故} - C_{好}}{2(C_{好} + C_{故})} = \frac{1}{2(2M'N' - 2N' + 1)}$$

保护随着电容器元件击穿个数的增加, 这个比值也相应增加。

采用比值检测法的优点在于电容器充电后保护可以自动检测当前电容器的不平衡情况, 与桥差法相同, 由于电容器的制造偏差, 需要在滤波器第一次充电或在更换电容器之后对不平衡电流进行校正。保护 I 段告警, II 段延时跳闸, III 段立即跳闸。动作判据为

$$I_{CT2校正} / I_{CT3} > K_{set}$$

其中: $I_{CT2校正}$ 为校正后的 C1 不平衡电流; K_{set} 为保护定值。

2.3 脉冲不平衡计数法

电容器比值不平衡保护和桥差过流保护的原理都是基于同一个桥臂上的电容器发生故障, 而实际中, 电容器故障很可能相继出现在各个桥臂, 这种情况下, 如图 2 所示的 T2 电流互感器中可能并不会流过太大的不平衡电流, 所以上文所述的电容器比值不平衡保护和桥差过流保护很可能无法检测到

故障^[7]。

脉冲不平衡计数法的原理是通过不平衡电流与总电流比值的变化量来判断是否有电容器元件损坏, 并采用双向计数逻辑。不平衡电流 T2 和总电流 T3 送入到保护装置, 得到实时偏差 ($\Delta I_{T2}/I_{T3}$), 通过与存储器中实时更新的初始偏差值进行比较, 偏差达到定值时将输出脉冲进行计数, 保护设有分支计数器和总计数器, 防止 H 桥两边各损坏相同个数电容器元件时, H 桥不平衡电流恢复正常, 保护无法可靠动作。保护判为

$$\Delta(\Delta I - \Delta I') > \Delta \quad \text{正方向动作}$$

$$\Delta(\Delta I - \Delta I') < -\Delta \quad \text{反方向动作}$$

当正方向动作时, 分支计数器加 1, 总计数器加 1; 当反方向动作时, 分支计数器减 1, 总计数器加 1。达到 I 段计数值时发告警信号, 达到 II 段计数值时延时跳闸, 达到 III 段计数值时立即跳闸。与比值检测法相比, 当电容器发生对称性的损坏时, 不平衡电流与总电流比值的变化量为负值, 因此, 脉冲检测法可以判断损坏电容器所在桥臂^[8]。

3 运行情况分析

中国南方电网公司所辖 7 条直流输电系统中, 交流滤波器 C1 不平衡保护主要采用了两种组合方式。在较早投运的 ± 500 kV 天广直流、 ± 500 kV 高肇直流和 ± 500 kV 兴安直流系统中, 均在脉冲不平衡保护三段保护的基础上, 应用比值检测法的原理增加配置了 IV 段保护, 如表 2, 在电容器出现严重不平衡故障时立即跳闸, 瞬时切断故障^[9]。

表 2 ± 500 kV 宝安换流站 C 型交流滤波器 C1 不平衡保护定值及动作后果

Table 2 Setting & consequence of the C1 unbalance protection for the C-type AC filter at ± 500 kV Baoan converter station

保护名称	保护定值	出口时间	动作后果
C1 不平衡保护	I 段	$I_{diff} > 2$ 或 $I_{sum} > 2$	$t_1 = 0$ m 告警
	II 段	$I_{diff} > 4$ 或 $I_{sum} > 4$	$t_2 = 2$ h 延时跳闸
	III 段	$I_{diff} > 5$ 或 $I_{sum} > 5$	$t_3 = 0$ ms 瞬时跳闸
	IV 段	$ \Delta I_{T2}/I_{T3} > 58.2\%$	$t_4 = 0$ ms 瞬时跳闸

± 800 kV 云广直流, 包括正在调试运行中的溪洛渡和糯扎渡工程均采用了 C1 比值不平衡保护和桥差过流保护相配合的保护原理。如表 3。

以 ± 500 kV 兴安直流宝安换流站和 ± 800 kV 云广直流穗东换流站运行情况为例, 分析两种不平衡保护配置方案的运行特点。穗东换流站自 2009 年投

运以来, 仅出现过三次不平衡保护动作事件, 其中一起导致跳闸, 故障原因是电容器套管断裂严重漏油, 其余两起均未三段动作出口跳闸。相比宝安换流站自 2007 年投运以来, 发生过多起 C1 不平衡保护动作事件, 仅以 C 型交流滤波器为例, 共发生过 C1 不平衡跳闸 5 起, 具体动作情况如表 4 所示。

表 3 ±800 kV 穗东换流站 A 型交流滤波器 C1 不平衡保护定值及动作后果

Table 3 Setting & consequence of the C1 unbalance protection for the A-type AC filter at ±800 kV Huidong converter station

保护名称	保护定值	出口时间	动作后果
C1 比值	I 段 $ \Delta I_{T2}/I_{T3} >0.266$	$t_1=5$ m	告警
不平衡	II 段 $ \Delta I_{T2}/I_{T3} >0.358$	$t_2=2$ h	延时跳闸
保护	III 段 $ \Delta I_{T2}/I_{T3} >0.464$	$t_3=0.05$ ms	延时跳闸
桥差过流保护	$I_{T2}>0.46$ A	$t=0.1$ ms	延时跳闸

表 4 C1 不平衡保护跳闸统计

Table 4 Trip statistics of C1 unbalance protection

时间	ACF	I 段/s	II 段/s	III 段/s	计数
2009-06-22	571 C 相	0	0	0	30
2009-07-19	581 B 相	0	0.7	0.7	5
2010-02-28	581 B 相	0	25.0	27.1	5
2010-08-14	574 B 相	0	175	175	5
2011-01-11	564 B 相	0	44.4	47.5	5

注: 以 I 段动作事件为参考时间点。

从跳闸统计可见, 不平衡 IV 段直接动作 1 次 (IV 段保护直接将计数置位为 30), I 段动作告警, II、III 段相继或同时动作后跳闸 4 次。

排除电容器生产厂家批次、运行环境及时间、滤波器组数量等客观因素, 综合分析两种保护配合方案及其运行情况, 可以看出采用脉冲不平衡计数为主保护的方案更容易动作, 且 II 段延时跳闸动作逻辑在实际运行中很少发挥作用。采用比值不平衡保护为主保护的方案运行则更加稳定, 除却严重故障, 个别电容器容值异常导致桥臂不平衡一般不会出口跳闸。

4 不平衡保护配合策略研究

脉冲不平衡计数法采用脉冲量与总电流量的比值为动作判据, 既可以有效消除稳态运行及交直流系统波动时穿越电流激变而导致的不平衡电流变化对保护的干扰, 也可以判断损坏的电容器桥臂的方位, 同时, 脉冲量与不平衡电流和总电流比值的 历史值无关, 对电容器配平的要求可以适当降低。

可见应用脉冲不平衡计数作为电容器保护的主保护更为合理。

通过对实际运行情况分析, 目前采用的不平衡计数原理的 C1 不平衡保护存在动作频繁, 定值设置不合理等缺陷。

4.1 不平衡计数定值研究

以宝安换流站 C 型交流滤波器 C1 不平衡保护配置为例, 保护整定时按电容器元件故障的个数整定, 通过表 1 对电容器故障后的过电压计算分析, 结合电容器内部元件过电压的能力, 其报警/延时跳闸/立即跳闸所对应的过电压能力分别为 1.3/1.5/1.7 p.u, 维持正常运行所允许故障元件数和不平衡电流值如表 5 所示。

表 5 不同情况下允许的故障元件数

Table 5 Number of fault elements allowed in different situations

保护段	元件过电压倍数	故障电容元件数	不平衡电流值/mA
报警	1.3	4	170
延迟跳闸	1.5	6	250
立即跳闸	1.7	7	360

通过对 C1 不平衡保护双向计数逻辑的研究, 以及保护跳闸的统计分析, 结合电容器内部元件的过电压能力, 发现目前的保护定值不利于提高保护的可靠性, 且使得 II 段保护的设置失去了意义, 建议进行调整, 调整后的定值如表 6 所示。

表 6 调整后的保护定值

Table 6 Setting & consequence after adjustment

保护名	保护定值	出口时间	动作后果
I 段	$I_{diff}>1$ 或 $I_{sum}>1$	$t_1=0$ ms	告警
II 段	$I_{diff}>4$ 或 $I_{sum}>4$	$t_2=2$ h	延时跳闸
III 段	$I_{diff}>6$ 或 $I_{sum}>6$	$t_3=0$ ms	瞬时跳闸
IV 段	$ \Delta I_{T2}/I_{T3} >58\%$	$t_4=0$ ms	瞬时跳闸

调整后的保护定值, 维持 I 段不变, 这样利于及早发现电容器的前期故障, 开展跟踪监视。根据实际分析计算结果, 将 II 段定值增加 1 次, III 段定值增加 2 次, 在不影响电容器运行的情况下, 通过调整定值可以更好地体现三段式保护的设置初衷, 在电容器 I 段、II 段动作后及时采取控制措施, 避免设备直接跳闸。

4.2 改进思路及配合策略研究

如图 2, 每当系统一次运算值满足定值 $|\Delta I_{T2}/I_{T3}|>3.8\%$ 时, 脉冲计数加 1, 每当系统一次运算值满足定值 $|\Delta I_{T2}/I_{T3}|>58.2\%$ 时, IV 段保护动作出

口跳闸。可见, 当系统一次采样值 $3.8\% < |\Delta I_{T2}/I_{T3}| < 58.2\%$ 时均被计算为 1 次脉冲计数, 该种逻辑存在严重不合理性, 不能及时检测到电容器故障的扩大情况。实际检修经验也证实, 对同样计数 1 次的电容器组检查, 其故障电容器的容值差距较大。初步建议对脉冲不平衡进行梯度设置, 在满足不同定值时采取多段位的计数策略, 如表 7。该种计数策略与保护三段出口的定值参数配合有待进一步仿真研究。

表 7 不同情况下的计数策略

Table 7 Counting logic in different situations		
保护段	定值	计数次数
1	$Q1 < \Delta I_{T2}/I_{T3} < Q2$	1
2	$Q2 < \Delta I_{T2}/I_{T3} < Q3$	2
3	$Q3 < \Delta I_{T2}/I_{T3} < Q4$	3
⋮	⋮	⋮

与此同时, 脉冲不平衡计数保护在电容器 C1 桥两边同时击穿的情况下不会计数; 认为合闸 500 ms 内不存在击穿现象, 即在合闸时电容器元件击穿保护也不会计数。当电容器发生内部极间短路故障, 内部或外部极对壳(外壳)短路故障时, 电容器内熔丝保护不能有效隔离短路故障而失灵, C1 不平衡保护只能使计数器增 1, 保护不一定动作, 这种情况下需设置桥差过流保护作为后备保护^[10]。

5 结论和建议

通过对三种不平衡保护原理的比较及两种配合策略在实际运行当中的特点分析, 得出结论, 采用脉冲计数原理, 通过计算不平衡电流与穿越电流比值的变化量来识别电容器内部故障, 具有更多的优越性, 但目前工程当中的设计原理需要改进。一种新的不平衡保护配合策略应该被考虑, 以增强交流滤波器 C1 不平衡保护的可靠性和准确性。

在系统出现扰动产生不平衡电流变化时, 不平衡计数器比较容易满足条件而动作。因此建议在不改变分支计数器定值的前提下, 适当提高总计数的动作定值, 以提高交流滤波器保护运行的可靠性。另外对于现有计数法 1 次计数对应的脉冲量横向跨度较大的缺陷, 建议对脉冲计数保护设计梯度策略, 即对于不同程度的脉冲跨度配合多段位的计数定值, 满足不同程度的故障保护能准确动作, 该设计的应用很好地将脉冲不平衡计数保护与比值不平衡保护相配合。同时建议配合桥差过流保护配合一些特殊情况下的电容器故障切除。

参考文献

- [1] 吴鹏, 汲胜昌, 曹涛, 等. 高压直流换流站交流滤波电容器降噪措施[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 166-173.
WU Peng, JI Sheng-chang, CAO Tao, et al. Audible noise reduction measures for filter capacitors in HVDC converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 166-173.
- [2] 曹涛, 汲胜昌, 吴鹏, 等. 高压直流换流站电容器的振动与噪声特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 91-97, 104.
CAO Tao, JI Sheng-chang, WU Peng, et al. Audible noise vibration and noise characteristics for capacitor in HVDC converter station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 91-97, 104.
- [3] 吴广宁, 李晓华, 冉汉政, 等. 高压脉冲造成储能电容器老化的直流局部放电测试技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 176-182.
WU Guang-ning, LI Xiao-hua, RAN Han-zheng, et al. Partial discharge under DC condition with pulse discharge degradation of high voltage storage capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 176-182.
- [4] 朱韬析, 王宁宁, 郭卫明, 等. 交流滤波器电容器 C1 不平衡保护在南方电网直流输电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 102-115.
ZHU Tao-xi, WANG Ning-ning, GUO Wei-ming, et al. The application of the unbalance current protection for capacitor of AC filter used in the HVDC system of CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 102-115.
- [5] 文继锋, 陈松林, 李海英, 等. 交流滤波器保护配置和实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 109-112.
WEN Ji-feng, CHEN Song-lin, LI Hai-ying, et al. Configuration and application of AC filter protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 109-112.
- [6] 余江, 周红阳, 赵曼勇. 高压电容器 C1 不平衡保护的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 85-89.

- YU Jiang, ZHOU Hong-yang, ZHAO Man-yong. Related problems of unbalance protection for high voltage capacitor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(13): 85-89.
- [7] 吴娅妮, 吕鹏飞, 王德林, 等. 交流滤波器高压电容器 C1 不平衡保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 56-59.
- WU Ya-ni, Lü Peng-fei, WANG De-lin, et al. New principle of unbalance current protection for capacitor of AC filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 56-59.
- [8] 段涛, 张智勇, 李德建, 等. ± 500 kV 换流站交流滤波器组不平衡电流调整新策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 135-140.
- DUAN Tao, ZHANG Zhi-yong, LI De-jian, et al. The new unbalanced current adjusting strategy of AC filter in ± 500 kV converter station[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 135-140.
- [9] 刘勋, 王丽君, 马俊民, 等. 电容器组 C1 不平衡保护动作原因分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 122-124.
- LIU Xun, WANG Li-jun, MA Jun-min, et al. Analysis of the unbalanced protection on capacitor bank[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 122-124.
- [10] 南方电网技术研究中心. 高压直流输电控制保护系统研究(交流滤波器部分)[R]. 2005.
-
- 收稿日期: 2013-05-30; 修回日期: 2013-09-11
- 作者简介:
- 李建勋(1988-), 男, 助理工程师, 从事高压直流输电方面的工作和研究; E-mail: lee.jianxun@163.com
- 吴贻志(1979-), 男, 工程师, 从事高压直流输电方面的工作和研究;
- 李豹(1983-), 男, 工程师, 从事高压直流输电方面的工作和研究。