

DOI: 10.7667/PSPC160632

## 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析

张开宇<sup>1</sup>, 崔勇<sup>1</sup>, 庄侃沁<sup>2</sup>, 缪源诚<sup>2</sup>, 杨增辉<sup>1</sup>, 冯煜尧<sup>1</sup>, 张琪祁<sup>1</sup>, 余颖辉<sup>1</sup>

(1. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 2. 国家电网华东分部, 上海 200120)

**摘要:** 随着直流的大规模馈入, 受端电网运行特性发生显著变化, 大量本地机组关停, 导致动态无功储备和电压支撑不足问题凸显, 电网承受扰动能力下降, 因此迫切要求配置同步调相机等动态无功补偿装置。通过仿真软件对电网加装调相机前后的电压稳定裕度、引起直流换相失败交流故障范围及短路电流水平进行仿真计算和比较分析, 全面评估了多直流馈入受端电网中时加装调相机后对系统运行的影响。该研究为同步调相机布点配置和参数选取提供有效参考和依据, 有助于推进多直流馈入大受端电网时同步调相机配置工作的开展。

**关键词:** 同步调相机; 多直流馈入; 受端电网; 电压稳定; 换相失败; 短路电流

### Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC

ZHANG Kaiyu<sup>1</sup>, CUI Yong<sup>1</sup>, ZHUANG Kanqin<sup>2</sup>, MIAO Yuancheng<sup>2</sup>, YANG Zenghui<sup>1</sup>, FENG Yuyao<sup>1</sup>,  
ZHANG Qiqi<sup>1</sup>, YU Yinghui<sup>1</sup>

(1. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China;

2. East Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** As multi-infeed HVDC systems are integrated into power grid, the operation characteristics of the receiving-end grid have changed remarkably. A large quantity of local generators have to be shut down, resulting in the shortage of dynamic reactive power reserve and voltage support and the downfall of power grid withstanding disturbance capacity. Therefore, it is urgent to install dynamic reactive compensation device such as synchronous compensators. The voltage stability margin, AC fault range causing DC mutation failure, and short-circuit current level before and after installing compensator in the power grid are simulated and comparatively analyzed through simulation software, and the influence of installing compensator in multi-feed receiving-end power grid on system operation is evaluated fully. The research provides effective reference for allocation and parameters selection of synchronous compensator and makes for promoting the development of synchronous compensator allocation for multi-feed receiving-end power grid.

**Key words:** synchronous compensator; multi-infeed; receiving-end power grid; voltage stability; commutation failure; short circuit current

## 0 引言

近几年, 随着大容量和远距离特高压交直流输电技术的发展, 大比例受电地区的集中出现, 电网特性发生较大变化。1) 直流馈入降低了系统动态无功储备。因直流的大规模馈入, 且本身不提供动态无功支撑, 受端电网电源增速明显放缓, 部分已投

产电源因系统调峰能力不足还需调停, 系统动态无功储备明显降低。2) 直流馈入恶化了系统电压调节特性。直流馈入的受端电网, 在交流系统电压降低时, 常规发电机组将增加无功出力, 而直流逆变站从系统吸收无功。常规电源和直流逆变站在系统电压降低时无功电压调节特性相反, 直流馈入恶化了系统电压调节特性。3) 直流馈入降低了系统抵御无功冲击的能力。由于直流大规模馈入替代了常规电源, 受端系统短路容量降低, 导致系统抵御无功冲击能力减弱, 在直流多馈入地区尤为明显。4) 直流

基金项目: 国家电网公司科技项目(52094016000X)“直流控制保护与受端电网配合性能提升技术研究”

换相失败恢复过程需从系统吸收大量无功。单一特高压直流换相失败，直流恢复过程中逆变侧从系统吸收 4000~5000 Mvar 的无功。若多回直流同时换相失败，将从系统吸收大量无功，带来巨大无功冲击。因此，随着电网“强直弱交”问题凸显，客观上要求直流大规模有功输送，必须匹配大规模动态无功，即“大直流输电、强无功支撑”<sup>[1-5]</sup>。

目前电力系统中应用比较广泛的动态无功补偿装置主要有同步调相机、静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器(SVG/STATCOM)等。调相机由于具有无功输出受系统电压影响小、能短时强励、能进相运行以及使用寿命长等优点，在很多国家已得到应用，如瑞典、阿根廷、加拿大、埃及、巴西等国家在大规模水电基地远距离外送的受端变电站加装调相机，法国、日本在电网中加装调相机来避免发生电压崩溃事故。

本文以华东多直流馈入受端电网为研究对象，通过仿真比较分析，全面评估了加装调相机前后，受端电网电压稳定、短路电流水平和直流换相失败范围的变化情况，全面分析调相机对受端电网系统运行的影响，从而为同步调相机布点配置和参数选取提供参考和依据。

### 1 同步调相机基本原理

同步调相机是一种专用的无功功率发电机，实质上是空载运行的同步电动机，其主要用途是向系统提供或吸收无功功率，改善功率因数，因此它与同步电动机一样，也是通过改变励磁电流的大小进行无功功率调控。在过励磁运行时，它向系统供给感性无功功率，提高系统电压；在欠励磁运行时，它从系统吸取感性无功功率，降低系统电压。当系统处于轻负荷运行时，需要将系统中某些发电机改为同步调相机，以吸收系统中多余的无功功率，达到系统的无功平衡。当系统发生严重电压跌落故障时，调相机会进入强励状态，短时间内提供大量无功，为系统提供紧急无功电压支撑，有助于直流功率和系统电压迅速恢复，防止电压崩溃<sup>[6]</sup>。

调相机具有如下技术特点：

- 1) 具备过载能力且无功输出受系统电压影响小。在强励作用下可短时间内发出超过额定容量的无功，并且对于持续时间较长的故障可提供较强的无功支撑。
- 2) 具备进相能力。调相机进相能力约为额定容量的 50%。
- 3) 运行稳定性好。调相机在制造上不存在技术难度，设备技术成熟，运行稳定性好。

- 4) 使用寿命长，占地面积小。调相机使用寿命约 30 年，占地面积约为同容量 SVC 的 1/3。

但调相机仍有一些不足之处：

- 1) 增加短路电流。故障时调相机将向系统输出短路电流，可能引起电网短路电流超标。
- 2) 旋转设备运维相对复杂，且功率损耗较 SVC 和 STATCOM 分别大 1.5 和 1.9 倍左右。
- 3) 调相机调节速度要慢于 SVC、STATCOM，从开始到发出最大无功需 2 s 左右。

### 2 计算条件

选取 2016 年华东电网夏季高峰典型运行方式，华东电网馈入直流共计 8 回，其中特高压直流 4 回，分别为复奉直流、锦苏直流、宾金直流和灵绍直流。

发电机采用详细的同步电机及其控制系统模型，包括励磁调节系统、电力系统稳定器及调速系统。负荷采用静态负荷模型<sup>[7]</sup>，上海、江苏、浙江和安徽选用 60%恒功率、40%恒阻抗负荷模型；福建选用 40%恒功率、60%恒阻抗负荷模型，负荷频率调节效应系数取 1.2、-2.0。

考虑在华东电网 5 个换流站内加装调相机，单台容量为 300 Mvar，具体布点方案如表 1 所示。

表 1 调相机布点方案

Table 1 Allocation scheme of synchronous compensators

| 布点    | 容量/Mvar |
|-------|---------|
| 绍兴换流站 | 2×300   |
| 金华换流站 | 2×300   |
| 奉贤换流站 | 2×300   |
| 苏州换流站 | 2×300   |
| 政平换流站 | 4×300   |

调相机仿真参数如表 2 所示。调相机励磁系统为常规自并励系统。

暂态稳定仿真计算使用 BPA 软件，直流模型均采用中国电科院开发的 DA 模型，模型参数与实际保持一致。直流闭锁后的静态电压稳定裕度评估使用 VSAT 软件，采用 PV 曲线分析方法进行电压稳定计算<sup>[8]</sup>。短路电流计算使用 PSSE 软件，采用基于经典假设条件的短路电流计算方法<sup>[9]</sup>。

### 3 加装调相机对系统运行的影响分析

#### 3.1 对静态电压稳定裕度的影响

浙江电网有宾金和灵绍两回特高压直流馈入，电压稳定性较为薄弱。加装调相机后，浙江电网静态电压稳定裕度系数变化情况如表 3 所示。

表 2 调相机仿真参数

Table 2 Simulation parameters of synchronous compensators

| 名称                         | 单位       | 数值       |
|----------------------------|----------|----------|
| 容量                         | Mvar     | 300      |
| 最大发出无功                     | Mvar     | 300      |
| 最大吸收无功                     | Mvar     | 150      |
| 直轴同步电抗 $X_d$               | %        | 139.9    |
| 横轴同步电抗 $X_q$               | %        | 136.8    |
| 直轴瞬变电抗(不饱和值) $X'_{d0}$     | %        | 18.6     |
| 直轴瞬变电抗(饱和值) $X'_d$         | %        | 16.3     |
| 横轴瞬变电抗(不饱和值)电抗 $X'_{q0}$   | %        | 36.5     |
| 横轴瞬变电抗(饱和值)电抗 $X'_q$       | %        | 32.1     |
| 直轴超瞬变电抗(不饱和值)电抗 $X''_{d0}$ | %        | 13.3     |
| 直轴超瞬变电抗(饱和值)电抗 $X''_d$     | %        | 12.3     |
| 横轴超瞬变电抗(不饱和值)电抗 $X''_{q0}$ | %        | 13.2     |
| 横轴超瞬变电抗(饱和值)电抗 $X''_q$     | %        | 12.2     |
| 直轴开路瞬变时间常数 $T'_{d0}$       | s        | 6.87     |
| 直轴开路超瞬变时间常数 $T''_{d0}$     | s        | 0.047    |
| 横轴开路瞬变时间常数 $T'_{q0}$       | s        | 0.763    |
| 横轴开路超瞬变时间常数 $T''_{q0}$     | s        | 0.092    |
| 定子漏抗 $X_L$                 | %        | 10.8     |
| 转子线圈直流电阻(75°C) $R_f$       | $\Omega$ | 0.2      |
| 定子每相直流电阻(75°C) $R_a$       | $\Omega$ | 0.002 58 |

表 3 加装调相机前后浙江电网静态电压稳定裕度变化情况  
Table 3 Static voltage stability margin variation of Zhejiang Electric Power Grid with and without synchronous compensators

|              | 正常方式   |        | 灵绍直流闭锁 |        | 宾金直流闭锁 |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|              | 加装前    | 加装后    | 加装前    | 加装后    | 加装前    | 加装后    |
| 有功负荷电压稳定极限   | 64 980 | 66 060 | 61 560 | 63 010 | 62 610 | 63 880 |
| 夏季高峰负荷       | 59 870 | 59 870 | 59 870 | 59 870 | 59 870 | 59 870 |
| 静态电压稳定裕度     | 5110   | 6190   | 1690   | 3140   | 2740   | 4010   |
| 静态电压稳定裕度系数/% | 8.54   | 10.34  | 2.83   | 5.24   | 4.58   | 6.7    |

由表 3 可以看出, 加装调相机后, 浙江电网正常方式和直流闭锁后静态电压稳定性均有了明显改善。加装调相机前, 灵绍直流闭锁和宾金直流闭锁后的裕度系数仅为 2.83%和 4.58%, 小于 5%的标准要求, 而加装调相机后, 裕度系数分别提升了 2.41%与 2.12%, 能满足标准要求。

### 3.2 对暂态电压稳定水平的影响

受端电网开机规模较小时, 因动态无功支撑不足容易诱发暂态电压稳定问题。调相机能在系统电压跌落时提供动态无功支撑, 有利于提高暂态电压

稳定水平。例如, 加装调相机前后, 绍兴-兰亭双线 N-2 故障后兰亭母线电压变化曲线如图 1 所示, 绍兴站调相机无功功率输出如图 2 所示。

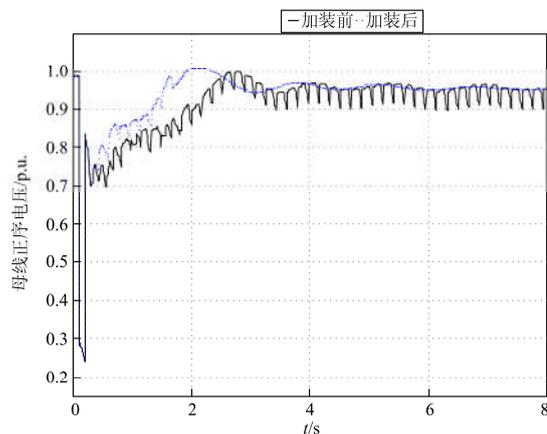


图 1 绍兴-兰亭 N-2 故障兰亭母线电压变化曲线  
Fig. 1 Voltage variation curve of Lanting bus after Shaoxing-Lanting N-2 fault

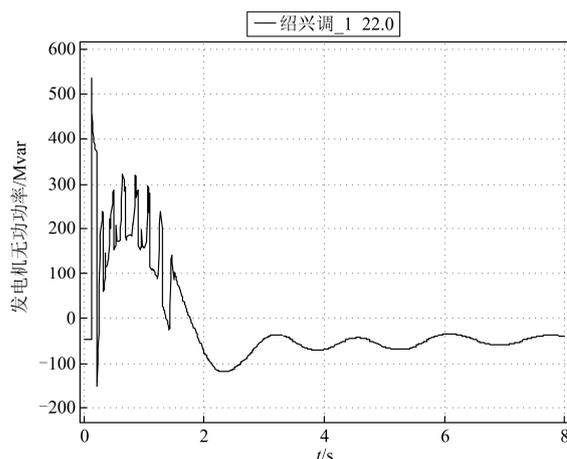


图 2 绍兴-兰亭 N-2 故障绍兴站调相机输出无功功率曲线  
Fig. 2 Reactive power output of the synchronous compensator in Shaoxing station after Shaoxing-Lanting N-2 fault

由图 1 和图 2 可以看出, 加装调相机前, 在交流故障切除后, 兰亭母线电压恢复速度较慢, 并且电压在 0.9~0.95 p.u.持续振荡, 无法保持平稳运行。加装调相机后, 当系统发生故障时, 换流站调相机进入强励状态, 短时间内发出大量无功, 为系统提供紧急无功电压支撑, 加快了故障切除后系统电压的恢复速度, 电压能恢复到 0.95 p.u.以上, 并能保持平稳运行, 因此调相机对提高系统暂态电压稳定水平效果明显。

### 3.3 对直流换相失败范围的影响

华东电网网架密集, 直流落点较近, 交流线路

发生故障时，一般会引引起多回直流同时换相失败，而且引起一回直流换相失败的交流线路故障范围也较广。由于调相机能够在故障期间提供动态无功支撑，可以抬升故障期间系统母线最低电压，因此可以降低直流发生换相失败的概率，缩小引起直流换相失败的交流故障的范围。例如对上海、江苏和浙江电网 500 kV 线路进行三永 N-1 故障和单永 N-1 故障扫描，加装调相机前后，引起华东特高压直流换相失败的交流故障数变化情况如表 4 所示。

表 4 加装调相机后引起特高压直流换相失败的交流故障数变化情况

Table 4 Number variations of AC faults causing UHVDC commutation failure with synchronous compensators

|           | 复奉直流 | 锦苏直流 | 宾金直流 | 灵绍直流 |
|-----------|------|------|------|------|
| 三永 N-1 故障 | -3   | -13  | -9   | -11  |
| 单永 N-1 故障 | -2   | -7   | -9   | -4   |

由表 4 可以看出，加装调相机后，引起特高压直流换相失败的交流故障数明显减少，三永 N-1 故障下，引起复奉、锦苏、宾金和灵绍直流换相失败的故障数分别减少了 3、13、9、11；单永 N-1 故障下，引起复奉、锦苏、宾金和灵绍直流换相失败的故障数分别减少了 2、7、9、4。因此表明加装调相机可以缩小引起直流换相失败的交流故障范围。

以碧溪一熟北三永 N-1 故障为例，加装调相机前后复奉直流功率变化曲线如图 3 所示。

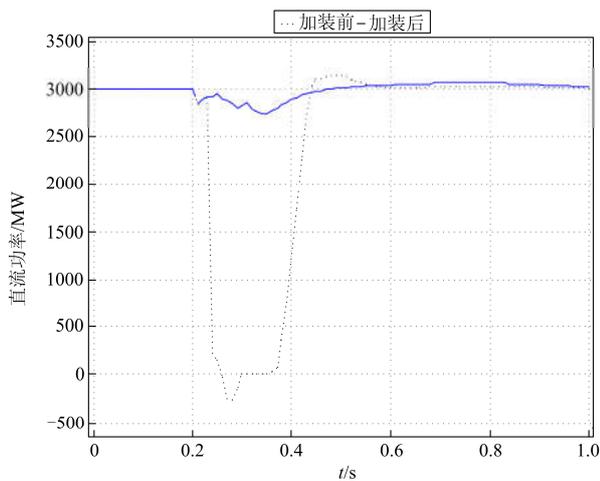


图 3 加装调相机前后碧溪-熟北三永 N-1 故障后复奉直流功率变化曲线

Fig. 3 DC power curve of Fufeng with and without synchronous compensators after Bixi-Shubei three-phase N-1 fault

由图 3 可以看出，加装调相机前，碧溪-熟北发生三永 N-1 故障后，复奉直流发生换相失败，直流功率跌到零，而加装调相机后，复奉直流未发生换

相失败，直流功率波动较小，对交流系统产生的冲击也大幅减小。

### 3.4 对母线短路电流水平的影响

调相机会在故障时向系统注入短路电流，因此需要评估加装调相机后母线短路电流水平，判断是否会引起短路电流超标。加装调相机前后以及不同调相机升压变阻抗参数下的华东部分 500 kV 母线三相和单相短路电流计算结果如表 5 所示。奉贤母线短路电流变化情况如图 4 所示。

由表 5 和图 4 可以看出：一台 300 Mvar 调相机对所接入换流站母线的短路电流贡献约为 1~1.2 kA；加装调相机后，华东 500 kV 母线三相短路电流和单相短路电流水平均有一定程度升高，其中远东、石牌、武南和金华等变电站短路电流水平已经接近甚至超过开关遮断能力；调相机升压变阻抗越小，短路电流水平上升幅度越高，但不同阻抗间短路电流水平上升幅度差异较小。

表 5 加装调相机前后以及不同升压变阻抗下部分 500 kV 母线短路电流计算结果

Table 5 Short circuit current of 500 kV bus with and without synchronous compensators with different transformer impedance

|    | kA   |      |          |      |      |      |      |      |
|----|------|------|----------|------|------|------|------|------|
|    | 加装前  |      | 调相机升压变阻抗 |      |      |      |      |      |
|    |      |      | 16%      |      | 14%  |      | 12%  |      |
| 三相 | 单相   | 三相   | 单相       | 三相   | 单相   | 三相   | 单相   |      |
| 奉贤 | 53.8 | 58.5 | 56.1     | 61.2 | 56.3 | 61.5 | 56.5 | 61.8 |
| 远东 | 55.0 | 59.8 | 57.4     | 62.4 | 57.6 | 62.7 | 57.8 | 63.1 |
| 三林 | 52.9 | 56.0 | 54.2     | 57.1 | 54.3 | 57.1 | 54.4 | 57.2 |
| 亭卫 | 57.3 | 59.8 | 58.3     | 60.6 | 58.4 | 60.6 | 58.5 | 60.7 |
| 顾路 | 54.6 | 57.5 | 55.4     | 58.2 | 55.5 | 58.2 | 55.6 | 58.3 |
| 黄渡 | 50.7 | 54.6 | 50.9     | 54.7 | 50.9 | 54.7 | 50.9 | 54.7 |
| 徐行 | 60.2 | 61.7 | 60.3     | 61.8 | 60.3 | 61.8 | 60.4 | 61.8 |
| 苏州 | 42.4 | 48.8 | 44.9     | 51.5 | 45.1 | 51.8 | 45.3 | 52.1 |
| 石牌 | 57.9 | 61.7 | 59.0     | 62.5 | 59.1 | 62.5 | 59.1 | 62.6 |
| 木渎 | 51.5 | 51.5 | 53.4     | 52.9 | 53.6 | 53.0 | 53.8 | 53.1 |
| 吴江 | 42.0 | 48.2 | 44.4     | 50.9 | 44.6 | 51.1 | 44.8 | 51.4 |
| 车坊 | 54.7 | 57.9 | 56.6     | 59.4 | 56.8 | 59.5 | 56.9 | 59.7 |
| 政平 | 55.0 | 53.0 | 59.9     | 58.9 | 60.2 | 59.5 | 60.6 | 60.3 |
| 武南 | 60.9 | 59.2 | 65.4     | 64.1 | 65.8 | 64.5 | 66.2 | 65.1 |
| 岷珠 | 43.0 | 42.1 | 44.5     | 43.3 | 44.6 | 43.4 | 44.7 | 43.5 |
| 泰兴 | 58.9 | 57.4 | 59.0     | 57.5 | 59.0 | 57.5 | 59.0 | 57.5 |
| 绍兴 | 55.1 | 54.8 | 57.5     | 57.6 | 57.7 | 57.9 | 57.9 | 58.3 |
| 王店 | 55.4 | 51.3 | 55.5     | 51.4 | 55.6 | 51.4 | 55.6 | 51.4 |
| 瓶窑 | 58.7 | 52.2 | 59.0     | 52.3 | 59.0 | 52.3 | 59.0 | 52.4 |
| 乔司 | 60.6 | 57.4 | 61.1     | 57.7 | 61.2 | 57.7 | 61.2 | 57.8 |
| 兰亭 | 54.6 | 49.5 | 55.9     | 50.4 | 56.0 | 50.4 | 56.1 | 50.5 |
| 金华 | 62.3 | 63.2 | 64.7     | 66.0 | 64.9 | 66.3 | 65.1 | 66.7 |
| 双龙 | 60.3 | 60.0 | 62.1     | 61.7 | 62.2 | 61.8 | 62.4 | 62.0 |

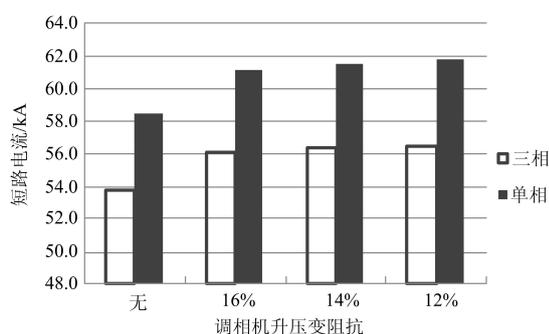


图4 加装调相机前后奉贤站短路电流变化情况

Fig. 4 Short circuit current variations of Fengxian station with and without synchronous compensators

## 4 结论

本文针对华东多直流馈入受端电网, 从对电压稳定、直流换相失败和短路电流水平的影响等方面, 全面仿真分析了加装调相机对系统运行的影响, 为多直流馈入受端电网解决动态无功不足问题提供了有效参考, 有助于推进多直流馈入大受端电网同步调相机配置工作的开展。主要结论有:

1) 调相机可以提高系统的静态电压稳定裕度。加装调相机后浙江电网正常运行方式、灵绍直流闭锁及金华直流闭锁条件下浙江电网的静态电压稳定裕度均有所提升, 并能满足标准要求。

2) 调相机能为系统提供紧急动态无功电压支撑, 有助于故障切除后系统电压的迅速恢复和电压的平稳运行, 提高系统暂态电压稳定水平。

3) 调相机能抬升故障期间系统最低电压, 可以降低直流系统发生换相失败的概率, 缩小引起直流换相失败的交流系统故障的范围。

4) 调相机对接入站点附近变电站的短路电流提升影响较大, 一台 300 Mvar 调相机对所接入母线的短路电流贡献约为 1~1.2 kA; 加装调相机后, 华东 500 kV 母线三相短路电流和单相短路电流水平均有一定程度升高, 其中远东、石牌、武南和金华等变电站短路电流水平已经接近甚至超过开关遮断能力。

## 参考文献

- [1] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥, 等. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.  
YANG Weidong, XU Zheng, HAN Zhenxiang, et al. Special issues and suggestions on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2000, 24(8): 13-17.
- [2] 徐政, 唐庚, 黄弘扬, 等. 消解多直流馈入问题的两种新技术[J]. 南方电网技术, 2013, 7(1): 6-14.  
XU Zheng, TANG Geng, HUANG Hongyang, et al. Two new technologies for eliminating the problems with multiple HVDC in-feeds[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(1): 6-14.

- [3] 彭忠, 李少华, 李泰, 等. 高压直流输电系统抑制换相失败的最小关断面积控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 75-80.  
PENG Zhong, LI Shaohua, LI Tai, et al. A minimum extinction area control strategy to suppress commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 75-80.
- [4] 汪隆臻, 刘常鸿, 霍海舟, 等. 含±800 kV 特高压直流的南方电网动态特性研究[J]. 中国电业(技术版), 2012(9): 1-6.  
WANG Longzhen, LIU Changhong, HUO Haizhou, et al. Research on China south power grid dynamic performance including ±800 kV UHVDC[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2012(9): 1-6.
- [5] 张勇, 罗滇生, 范幸, 等. 非解析复变电力系统动态无功点优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 28-34.  
ZHANG Yong, LUO Diansheng, FAN Xing, et al. Optimization configuration of dynamic reactive power point for non-analytical complex variable power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 28-34.
- [6] 戴寒光, 王渝红, 李兴源, 等. 高压直流换流站无功补偿装置及其特性分析[J]. 华东电力, 2012, 40(8): 1355-1361.  
DAI Hanguang, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Reactive power compensation device of HVDC converter station and its characteristic analysis[J]. East China Electric Power, 2012, 40(8): 1355-1361.
- [7] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.  
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.
- [8] 杨凌辉, 崔勇. 上海大都市电网“强馈入弱开机”方式下电压稳定分析[J]. 华东电力, 2014, 42(12): 2755-2757.  
YANG Linghui, CUI Yong. Voltage stability analysis for Shanghai metropolitan grid with high-level power import and scale-reduced online units[J]. East China Electric Power, 2014, 42(12): 2755-2757.
- [9] 冯煜尧, 祝瑞金, 庄侃沁, 等. 华东电网短路电流计算标准研究[J]. 华东电力, 2012, 40(1): 74-78.  
FENG Yuyao, ZHU Ruijin, ZHUANG Kanqin, et al. Short-circuit current calculation standard for east China power grid[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 74-78.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-12-25

作者简介:

张开宇(1990—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事电力系统仿真分析工作; E-mail: zhang\_ky@163.com

崔勇(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真分析工作; E-mail: yongzhe578@163.com

庄侃沁(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统调度运行管理工作。

(编辑 魏小丽)