

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181418

# 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究

赵静波, 孟侠, 朱鑫要

(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 同步调相机作为特高压直流配套工程投产后, 开展其对受端电网运行影响以及协调控制策略研究具有重要现实意义。首先分析了大型同步调相机的无功运行特性, 建立了不同时间尺度下的调相机无功电压模型。其次通过华东实际电网算例, 仿真分析了对电压特性、短路电流以及换相失败等的影响。仿真结果表明, 调相机接入后可以有效提升电压支撑能力, 显著增强电网强度, 降低换相失败风险, 验证了理论分析的正确性。最后提出将调相机接入 AVC 统一调配, 并采用较小静态调差系数和稳态迟相运行的控制策略, 可充分发挥调相机的动态无功支撑作用。

**关键词:** 同步调相机; 多馈入短路比; 电压稳定; 换相失败; 短路电流; 控制策略

## Research on synchronous condenser's influences on receiving-end provincial grid and its control strategy

ZHAO Jingbo, MENG Xia, ZHU Xinyao

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** After synchronous condenser being put into operation as the match project of UHVDC transmission, it's reasonable to investigate its influence on the operation of large-scale AC-DC hybrid grids, as well as explore its control strategy. Firstly, this paper researches the reactive power characteristics of condenser and builds its reactive power supporting models for different time scales. Secondly, simulations are carried out with the East China Power Grid, the condenser's influences on voltage characteristics, short-circuit current and commutation failure characteristics are analyzed. The result reveals that condenser could considerably enhance the voltage supporting capability, improve the power grid strength and decrease the risk of UHVDC commutation failure. The validity of theoretical analysis is also verified by the simulation. Finally, a unified dispatch strategy which adopts small difference coefficients and steady lagging-phase operation is proposed for integrating the condenser into AVC system. By adopting the proposed strategy, condenser's dynamic reactive power supporting function can be sufficiently utilized.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607092).

**Key words:** synchronous condensers; multi-infeed short circuit ratio; voltage stability; commutation failure; short-circuit current; control strategy

## 0 引言

作为“西电东送”大受端负荷中心, 同时也是国网系统最大的省级电网, 由于自身资源禀赋特征, 可供开发的电力资源有限, 江苏电网一直存在电力紧缺矛盾, 2017 年江苏全省最高用电负荷超过 1 亿 kW, 其中区外受电约占 30%。随着负荷的增长, 江苏电力需求将进一步增加, 根据“十四五”规划, 除已投运的锡盟—泰州、雁门关—淮安、锦屏—苏州特高压直流, 将再建设陇彬、白鹤滩两回特高压

直流, 届时江苏电网将成为拥有 5 回、约 4 500 万 kW 特高压直流的大受端电网<sup>[1-2]</sup>。

特高压直流大容量、高密度集中馈入江苏电网后, “强直弱交”问题凸显。一方面, 特高压直流接入后, 常规机组为满足直流消纳和调峰需求大量关停, 导致系统无功电压支撑能力不足, 总体调节能力下降; 另一方面, 正常工况下直流本身不向系统提供动态无功, 在系统发生故障的动态过程中, 直流从系统吸收的无功功率将大幅增加, 带来的无功冲击极有可能造成系统失稳<sup>[3]</sup>。由此引发的换相失败、动态无功储备和电压支撑不足等问题突出, 受端电网的安全稳定运行受到严重威胁, 客观要求直

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”。

目前动态无功补偿设备主要有静态同步补偿器(SVG/STATCOM)、静止无功补偿器(SVC)和同步调相机<sup>[4]</sup>。调相机作为旋转设备, 与 SVC、STATCOM 等基于电力电子技术的动态无功补偿装置相比, 具有补偿容量大、可进相运行、快速强励、电压恢复速度快及使用寿命长等优点, 既可为系统提供短路容量, 又具有良好的无功出力特性, 在降低直流送端暂态过电压、抑制直流受端换相失败、利用强励提高系统稳定性等方面具备独特优势<sup>[5-10]</sup>, 在电力系统中得到广泛应用。

本文以多直流馈入的江苏电网为研究对象, 首先分析了调相机无功特性及不同时间尺度下的运行特性; 其次, 从多馈入短路比、静态电压稳定裕度、电压特性、换相失败及短路电流水平等方面仿真论证了调相机对直流受端电网的影响及应用效果; 最后, 对调相机运行控制策略进行了深入研究, 旨在为调相机工程运行提供技术支撑, 充分发挥其正常和故障方式下对系统的调节能力。

### 1 同步调相机的基本特性

同步调相机的基本结构如图 1 所示。区别于一般的同步电机, 调相机无原动机和调速系统, 只具备向系统提供或吸收无功功率的能力, 通过改变励磁电流的大小进行无功控制, 过励时输出感性无功以提高电压, 欠励时吸收感性无功以降低电压<sup>[11-13]</sup>。

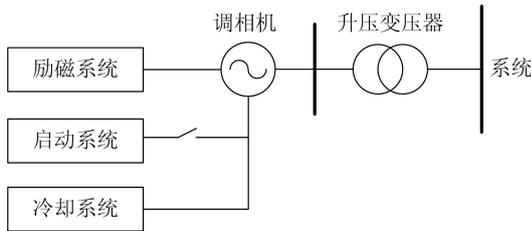


图 1 同步调相机的基本结构

Fig. 1 Basic structure of synchronous condenser

#### 1.1 同步调相机无功特性

忽略定子绕组电阻, 调相机电气相量关系如图 2 所示。

$U$  为升压变高压侧电压,  $U_t$  为机端电压,  $E_q''$  为  $q$  轴次暂态电势,  $E_q$  为  $q$  轴虚拟电动势,  $E_q$  为励磁电势,  $\delta$  为  $E_q$  与  $U$  的夹角。同步调相机无功功率  $Q$  可表示为<sup>[14]</sup>

$$Q = E_q U / X_d \cos \delta - U^2 / 2(1/X_d + 1/X_q) + U^2 / 2(1/X_q - 1/X_d) \cos 2\delta \quad (1)$$

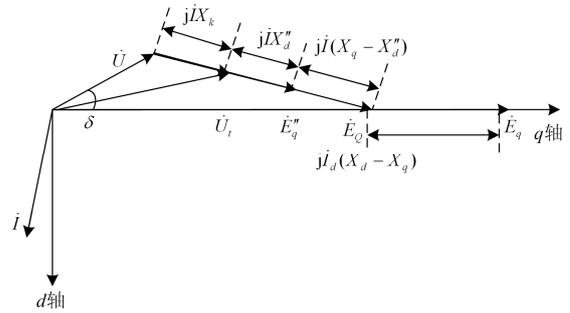


图 2 调相机电气相量图

Fig. 2 Electrical phasor diagram of synchronous condenser

调相机向系统提供的无功功率为

$$Q = U_q i_d - U_d i_q \quad (2)$$

正常运行时, 调相机从电网吸收的有功功率不大于 1.4%, 主要是克服各种机械摩擦转矩和定转子损耗。正常运行及故障期间有:  $\delta \approx 0$ ,  $U_d \approx 0$ ,  $U_q \approx U$ 。式(2)可表示为:  $Q \approx U_q i_d \approx U i_d$ 。

当系统发生故障时, 无功增量为

$$\Delta Q = Q - Q_0 = U i_d - U_0 i_{d0} \approx (U_0 + \Delta U)(i_{d0} + \Delta i_d) - U_0 i_{d0} = U \Delta i_d + \Delta U i_{d0} \quad (3)$$

式中:  $\Delta U$  为高压侧母线变化量;  $U$  为故障后电压;  $\Delta i_d$  为  $d$  轴电流(无功电流)增量;  $i_{d0}$  为  $d$  轴电流初始值。  $\Delta U$  和  $U$  仅取决于网架结构、系统容量和故障类型, 与调相机参数没有直接的关系。  $\Delta i_d$  与调相机参数密切相关;  $i_{d0}$  与故障前调相机的初始工况有关。因此, 可通过合理安排调相机运行方式、选择合适的参数使故障时  $\Delta i_d$  的响应特性更满足系统需求。

#### 1.2 同步调相机不同时间尺度下的运行特性

按照时间尺度电力系统事故后运行可划分为次暂态、暂态和稳态三个过程<sup>[15]</sup>, 调相机可分别在三个过程发挥作用, 为系统提供动态无功支撑, 如图 3 所示。

1) 次暂态特性。调相机在故障瞬间内电势保持不变, 可瞬时发出/吸收大量无功。加装于直流受端时, 可瞬时发出大量无功, 支撑电网电压, 尤其对于多直流馈入电网, 可减少多回直流同时换相失败几率, 提高电网安全稳定水平。

假设调相机升压变高压侧母线电压由  $U_0$  突然跌落至  $U$ , 因为  $\Delta U_q \approx \Delta U$ , 直流分量稳态值为  $\Delta U / X_d + X_k$ , 交流分量初始幅度值  $\Delta U / X_d'' + X_k$ , 其中,  $X_d''$ 、 $X_k$  分别为次暂态电抗、调相机升压变短路电抗, 将其代入式(3)中, 电网故障时调相机向系统提供的瞬时无功功率可表达为

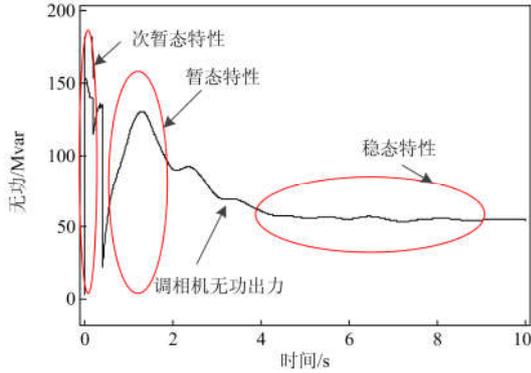


图3 调相机3种运行特性示意图

Fig. 3 Three operating characteristics of synchronous condenser

$$\Delta Q = -\frac{U\Delta U}{X_d'' + X_k} + \Delta U i_{d0} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, 调相机向系统提供的瞬时无功主要取决于  $X_d''$ 、 $X_k$  和  $i_{d0}$ , 三者越小, 调相机的瞬时无功支撑能力越强。

2) 暂态特性。即强励特性, 短时(1 s)能够发出额定容量 2 倍以上无功。当直流受端系统发生严重故障导致电压大幅跌落时, 调相机进入强励状态, 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。

忽略阻尼绕组和定子暂态过程, 调相机  $d$  轴暂态特性方程为

$$\Delta i_d = (\Delta E_q' - \Delta U) / (X_d' + X_k) \quad (5)$$

$$\Delta E_q' = \frac{(X_d' + X_k)}{(X_d' + X_k)T_{d0}'s + X_d + X_k} [\Delta E_{fd} + (X_d - X_d')\Delta U] \quad (6)$$

#### (1) 小扰动暂态特性

如果静止励磁系统采用简单惯性环节:

$$\Delta E_{fd} = \frac{-K_A}{1 + T_E s} \Delta U_i \quad (7)$$

$$\Delta U_i = \Delta U + \Delta i_d X_k = \frac{X_k \Delta E_q' + X_d' \Delta U}{X_d' + X_k} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6), 可得到小扰动故障下调相机暂态特性方程。

$$\Delta i_d = -\frac{K_{3E}(K_A + 1) - 1}{X_d' + X_k} (1 - e^{-\frac{t}{K_{3E}T_{d0}'}}) \otimes \Delta U - \frac{\Delta U}{X_d' + X_k} - \left[ \frac{K_A + 1}{X_d' + X_k + K_A X_k} - \frac{1}{X_d' + X_k} \right] (1 - e^{-\frac{-(X_d' + (1 + K_A)X_k)t}{(X_d' + X_k)T_{d0}'}}) \otimes \Delta U - \frac{\Delta U}{X_d' + X_k} \quad (9)$$

分别对  $X_d'$ 、 $X_d$  和  $X_k$  求导可知,  $X_d'$  越小对提高小扰动初始的无功支撑越有利, 越大对小扰动后期的无功支撑越有利; 较小的  $X_d$ 、 $X_k$  和越有利于提高调相机小扰动的暂态无功输出。

#### (2) 强励暂态特性

不考虑调相机饱和, 忽略换相压降, 系统严重故障导致电压大幅跌落时, 最大励磁感应电动势  $E_{fd \max}$  及增量  $\Delta E_{fd}$  可表示如下。

$$E_{fd \max} = \frac{K_{UP} U_i U_{fn}}{U_{FDB}} = K_M U_i \quad (10)$$

$$\Delta E_{fd} = E_{fd \max} - E_{fd0} = K_M U + i_{d0} (K_M X_k - X_d + X_d') - E_{q0}' + \Delta i_d K_M X_k \quad (11)$$

$$i_{d0} = \frac{E_{q0}' - U_0}{X_d' + X_k} = \frac{E_{q0}' - U + \Delta U}{X_d' + X_k} \quad (12)$$

式(11)、式(12)代入式(5)可得

$$\Delta i_d = \frac{K_E (K_M - 1) + 1}{(X_d' + X_k)} (1 - e^{-\frac{t}{K_E T_{d0}'}}) \otimes \Delta U - \frac{1}{(X_d' + X_k)} (1 - e^{-\frac{t}{K_E T_{d0}'}}) \otimes E_{q0}' - \frac{\Delta U}{(X_d' + X_k)} \quad (13)$$

$$K_E = \frac{X_d' + X_k}{X_d + X_k - K_M X_k} \quad (14)$$

式中:  $U_{fn}$  为额定励磁电压, 标么值;  $U_{FDB}$  为励磁电压基准值;  $K_M$  为额定电压下最大励磁输出电压相对于励磁基准电压的倍数。

#### 3) 稳态特性

调相机具备稳态特性, 根据最新的试验结果, 300 Mvar 调相机具备 300 Mvar 滞相和 170~200 Mvar 进相的持续运行能力<sup>[16-17]</sup>。在直流受端交流系统故障清除后, 可能存在系统电压无法恢复至稳态电压运行范围内的情况, 调相机进入滞相运行, 由于相对于其他发电机组, 调相机惯性时间常数较小, 阻尼较大, 此时可将调相机等效为一个静止的无功负荷, 改善系统稳态电压水平<sup>[18]</sup>。

## 2 计算说明

基于 2018 年华东“四省一市”夏季高峰电网开展仿真研究。特高压直流采用 DA 模型; 同步发电机采用考虑阻尼绕组的次暂态电势  $E_q''$ 、 $E_d''$  变化的详细模型, 并且考虑励磁调节系统、调速系统的作用; 落点江苏电网的特高压直流换流站配套调相机具体如表 1 所示。

暂态稳定计算采用 PSD-BPA 软件, 静态电压稳定裕度和短路电流计算采用 PSSE 软件, 直流多

馈入短路比计算采用 PSASP 软件。

表 1 调相机在江苏的布点方案

Table 1 Allocation scheme of synchronous compensators of Jiangsu

| 布点    | 容量/Mvar |
|-------|---------|
| 苏州换流站 | 2×300   |
| 淮安换流站 | 2×300   |
| 泰州换流站 | 2×300   |
| 政平换流站 | 4×300   |

### 3 调相机对受端电网的影响

#### 3.1 对直流多馈入短路比的影响

多馈入短路比(MISCR)/多馈入有效短路比(MIESCR)是评价多直流馈入受端电网电压支撑能力和接受直流功率能力的重要量化指标,可衡量交直流系统间的相对强弱关系,反映了受端电网的稳定情况。一般认为换流器交流母线 MIESCR 小于 3 的受端电网为弱系统,大于 3 的为强系统, MIESCR 值越大受端系统越稳定<sup>[19-21]</sup>。

落点江苏的直流加装调相机前后换流器母线多馈入短路比/有效短路比如表 2 所示。

表 2 加装调相机前后 MISCR/MIESCR 变化情况

Table 2 Variation of MISCR/MIESCR with and without synchronous compensators

| 换流器母线名称   | 加装调相机前 |        | 加装调相机后 |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
|           | MISCR  | MIESCR | MISCR  | MIESCR |
| 国淮安_-525  | 5.48   | 5.29   | 6.42   | 5.55   |
| 国泰换_-1050 | 6.35   | 6.17   | 7.20   | 6.38   |
| 国泰换_-525  | 6.80   | 6.58   | 8.41   | 7.27   |
| 国苏州_-525  | 3.46   | 3.12   | 4.54   | 4.21   |
| 国政平_-525  | 6.78   | 6.65   | 7.97   | 7.83   |

由表 2 可得,加装调相机后,雁淮、锡泰、锦苏、政平直流多馈入短路比/有效短路比均有所提高,且加装前后, MIESCR 均满足大于 3.0 的要求,其中,政平直流 MIESCR 提升效果最明显。在无旋备且未加装调相机情况下,锦苏直流 MIESCR 值仅为 3.1,近区稳定性略差。在加装调相机后, MIESCR 提高至 4.2,近区电网稳定性明显提高。

#### 3.2 对电压稳定性的影响

##### 1) 静态电压稳定裕度

直流加装调相机前后,江苏电网静态电压稳定裕度变化情况如表 3 所示。由表 3 可知,加装调相机后,江苏电网正常运行、交流线路 N-2 故障后、直流闭锁故障后的静态电压稳定裕度均有明显提高。加装调相机前,正常运行及锦苏直流闭锁故障方式裕度系数为 8.6%、6.6%,不满足《电力系统安

全稳定导则》正常方式大于 10%、故障方式大于 8% 的规定;加装调相机后,裕度系数分别达到了 11.9%、10.1%(提升了 3.3%、3.5%),可满足标准要求。

表 3 加装调相机前后江苏电网静态电压稳定裕度变化情况

Table 3 Static voltage stability margin variation of Jiangsu Power Grid with and without synchronous compensators

| 江苏电网              | 正常方式   |        | 武南一瓶窑 N-2 |        | 锦苏直流闭锁 |        |
|-------------------|--------|--------|-----------|--------|--------|--------|
|                   | 接入前    | 接入后    | 接入前       | 接入后    | 接入前    | 接入后    |
| 有功负荷电压稳定极限/万 kW   | 10 992 | 11 326 | 10 947    | 11 302 | 10 789 | 11 139 |
| 夏季高峰负荷(计算负荷)/万 kW | 10 118 | 10 118 | 10 118    | 10 118 | 10 118 | 10 118 |
| 静态电压稳定裕度/万 kW     | 874    | 1 208  | 829       | 1 184  | 671    | 1 021  |
| 静态电压稳定裕度系数/%      | 8.6    | 11.9   | 8.2       | 11.7   | 6.6    | 10.1   |

##### 2) 稳态电压

考虑直流配套调相机均投运,分析锡泰、雁淮、锦苏、政平换流站调相机对近区 500 kV 母线稳态电压的影响,结果如表 4 所示。

表 4 调相机无功出力对近区母线稳态电压的影响

Table 4 Reactive power of synchronous compensator's influence of near zone bus steady state voltage

| 换流站   | 母线  | 单台调相机无功出力/Mvar |       |       | 电压影响值/kV |      |      |
|-------|-----|----------------|-------|-------|----------|------|------|
|       |     | -150           | 0     | 300   | 向下       | 向上   | 范围   |
| 苏州换流站 | 苏州  | 493.4          | 501.1 | 513.8 | -7.7     | 12.7 | 20.4 |
|       | 木渎  | 494.5          | 500.8 | 511.4 | -6.3     | 10.6 | 16.9 |
|       | 吴江  | 493.3          | 501   | 513.7 | -7.7     | 12.7 | 20.4 |
| 淮安换流站 | 车坊  | 494.1          | 499.7 | 509.1 | -5.6     | 9.4  | 15   |
|       | 淮安  | 515.6          | 520.8 | 529.6 | -5.2     | 8.8  | 14   |
|       | 三汊湾 | 507.9          | 511.9 | 518.8 | -4       | 6.9  | 10.9 |
| 锡盟换流站 | 安澜  | 520            | 524.5 | 532.2 | -4.5     | 7.7  | 12.2 |
|       | 泰换  | 515.4          | 522.5 | 534.2 | -7.1     | 11.7 | 18.8 |
|       | 旗杰  | 517.5          | 521.1 | 526.9 | -3.6     | 5.8  | 9.4  |
| 政平换流站 | 双草  | 513            | 518.4 | 527.3 | -5.4     | 8.9  | 14.3 |
|       | 凤城  | 516            | 521   | 529.3 | -5       | 8.3  | 13.3 |
| 政平换流站 | 政平  | 502.4          | 511.7 | 528.2 | -9.3     | 16.5 | 25.8 |
|       | 武南  | 502.3          | 510.8 | 525.9 | -8.5     | 15.1 | 23.6 |
|       | 阳羨  | 505.4          | 513.1 | 527.6 | -7.7     | 14.5 | 22.2 |

由表 4 可得,调相机的接入对江苏电网直流近区 500 kV 母线稳态电压的调节作用较为明显,对换流站母线电压的调节范围约为 15~26 kV。政平配套调相机的调节效果最为明显,当其 4 台调相机无功出力均达到其上下限时,政平换流站近区 500 kV 母线电压下降约 8~10 kV、上升约 14~16.5 kV。

### 3) 暂态电压

加装调相机前后, 木渎—苏州双线在木渎侧发生  $N-2$  故障后, 木渎变母线电压变化及调相机无功出力变化如图 4、图 5 所示。

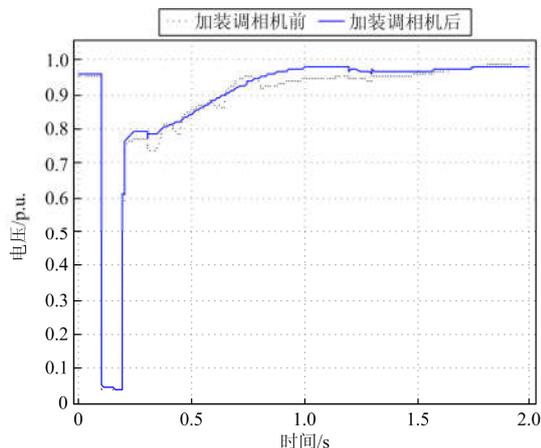


图 4 木渎—苏州双线  $N-2$  故障后木渎变母线暂态电压变化  
Fig. 4 Voltage variation curve of Mudu station bus after Mudu-Suzhou  $N-2$  fault

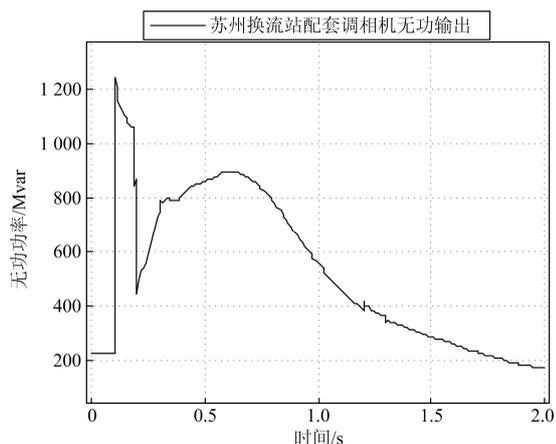


图 5 木渎—苏州双线  $N-2$  故障后调相机无功出力变化  
Fig. 5 Reactive power output of the synchronous compensator after Mudu-Suzhou  $N-2$  fault

由图 4 可知, 木渎—苏州双线三永  $N-2$  故障后的暂态期间, 木渎变母线电压急剧跌落, 电压恢复较慢, 并不断振荡, 而调相机可在故障发生瞬时响应, 快速发出大量无功, 为系统提供紧急无功电压支撑, 提高了暂态电压水平, 并加快故障后电压的恢复。同时由图 5 可知, 苏州换流站调相机进相/迟相无功储备均较为充足。

若锦苏直流发生双极闭锁, 故障后 1 s 切除换流器第 1 组滤波器, 之后每隔 1 s 切除 1 组滤波器, 直到全部切除, 苏州换流站母线暂态电压变化如图 6 所示。

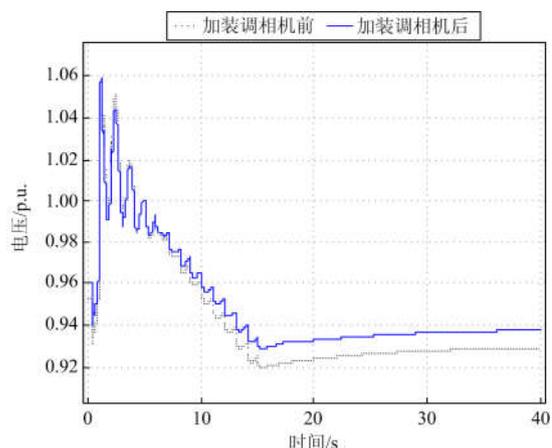


图 6 锦苏直流双极闭锁后苏州换流站母线暂态电压变化  
Fig. 6 Voltage variation curve of Suzhou converter station bus after Jinsu DC bipolar block fault

由图 6 可得, 调相机的接入, 一定程度上减少了直流闭锁后换流站母线电压的波动(提升暂态电压的谷值, 减小暂态电压的峰值), 提高了暂态电压水平和故障后稳态电压水平。

### 3.3 对直流换相失败特性的影响

江苏电网网架复杂, 电气联系紧密, 交流线路故障有可能导致单一直流换相失败, 甚至引起多回直流同时换相失败, 造成直流输送功率的中断<sup>[22-23]</sup>。考虑调相机加装前后, 对江苏电网 500 kV 及以上交流线路  $N-1$  和  $N-2$  故障扫描, 得到引起特高压直流换相失败的交流故障个数变化情况, 如表 5 所示。

表 5 加装调相机后引起特高压直流换相失败的交流故障数  
Table 5 Number variations of AC faults causing HVDC commutation failure with synchronous compensators

|          | 雁淮<br>直流 | 锡泰<br>直流 | 锦苏<br>直流 | 两回直流(雁淮+锡泰/<br>淮+锦苏/锦苏+锡泰) |
|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
| $N-1$ 故障 | -1       | -5       | -4       | -5                         |
| $N-2$ 故障 | -8       | -4       | -3       | -1                         |

由表 5 可得, 加装调相机后, 引起特高压直流换相失败的交流故障个数减少。由于调相机的动态无功支撑能力可提高故障后暂态最低电压, 支撑系统电压和直流功率的快速恢复, 从而降低了发生直流换相失败的概率, 减少连续换相失败次数。

以石碑—熟二双线石碑侧发生三永  $N-2$  故障为例, 加装调相机前后锦苏直流功率变化如图 7 所示。

由图 7 可得, 未加装调相机时, 若石碑—熟二在石碑侧发生三永  $N-2$  故障, 故障后 0.6 s 内发生 3 次换相失败, 按照目前直流控制保护逻辑, 锦苏直流将闭锁, 而加装调相机后, 锦苏直流换相失败次数减少为 1 次, 并迅速恢复稳定, 避免了直流闭锁, 减小了对系统的冲击。

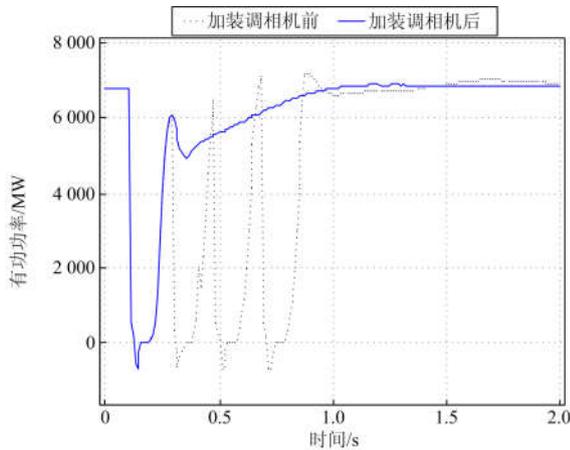


图 7 石牌—熟二三永 N-2 故障后锦苏直流功率变化曲线  
Fig. 7 DC power variation curve of Jinsu after Shipai-Shu'er three-phase N-2 fault

### 3.4 对短路电流水平的影响

同步调相机作为旋转设备，会在故障后向系统提供一定的短路电流，对短路电流有助增作用<sup>[24]</sup>。因此需分析加装调相机后近区 500 kV 变电站母线短路电流是否超标，得到结果如表 6 所示。

表 6 加装调相机前后，直流近区 500 kV 变电站母线短路电流变化

Table 6 500 kV substation bus short circuit current variation of DC near zone

| 厂站  | 加装调相机前 |      |        |      | 加装调相机后 |      |        |      |
|-----|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
|     | 500 kV |      | 220 kV |      | 500 kV |      | 220 kV |      |
|     | 三相     | 单相   | 三相     | 单相   | 三相     | 单相   | 三相     | 单相   |
| 双溧  | 51.0   | 43.9 | 55.3   | 50.3 | 51.4   | 44.2 | 55.4   | 50.4 |
| 三汊湾 | 52.8   | 49.1 | 44.1   | 47.7 | 54.3   | 50.4 | 44.2   | 47.9 |
| 安澜  | 53.4   | 53.1 | 46.1   | 50.7 | 55.5   | 55.2 | 46.5   | 51.0 |
| 泰兴  | 53.9   | 52.1 | 45.8   | 45.6 | 54.1   | 52.2 | 45.9   | 45.6 |
| 旗杰  | 38.0   | 30.8 | 29.4   | 21.9 | 38.7   | 31.1 | 29.5   | 22.0 |
| 双草  | 34.7   | 34.5 | 29.1   | 35.0 | 36.1   | 35.6 | 29.5   | 35.3 |
| 凤城  | 40.9   | 40.8 | 46.9   | 50.4 | 42.4   | 41.8 | 47.5   | 50.9 |
| 盐都  | 43.5   | 38.3 | 45.8   | 44.7 | 43.8   | 38.5 | 45.9   | 44.8 |
| 吴江  | 42.9   | 49.0 | 45.0   | 48.1 | 45.7   | 52.2 | 46.1   | 49.0 |
| 木渎  | 53.5   | 52.8 | 40.3   | 40.1 | 55.4   | 54.2 | 40.6   | 40.2 |
| 车坊  | 55.7   | 58.4 | 42.8   | 46.1 | 57.8   | 60.1 | 43.2   | 46.4 |
| 玉山  | 54.4   | 54.6 | 40.8   | 45.2 | 55.9   | 55.6 | 41.0   | 45.3 |
| 武南  | 61.4   | 59.7 | 45.4   | 44.1 | 66.7   | 65.8 | 46.2   | 44.7 |
| 惠泉  | 62.4   | 57.5 | 47.3   | 47.2 | 65.5   | 60.0 | 47.7   | 47.5 |
| 阳羨  | 41.8   | 40.7 | 44.1   | 49.9 | 43.8   | 41.4 | 44.8   | 50.6 |

由表 6 可得，加装调相机后，直流近区变电站母线 500 kV/220 kV 三相、单相短路电流水平均有一定提高，不会造成新的 220 kV 短路电流超标问题。武南变和惠泉变的助增效果最为明显，武南变

500 kV 三相、单相短路电流分别增大了 5.4 kA、6.1 kA，惠泉变增大了 3.1 kA、2.5 kA，从而导致武南变 500 kV 三相/单相短路电流、惠泉变 500 kV 三相短路电流超过开关遮断能力，武南—惠泉—梅里在惠泉处出串即可解决。

## 4 调相机的控制策略

江苏电网作为大型受端电网，境内的各直流输电换流站部署新一代 300 Mvar 调相机的主要目的是故障工况下快速向系统提供动态无功支撑，提高换流站近区电压稳定水平，保障系统的稳定性。为充分发挥调相机的动态无功功能，从调相机参与系统电压调节、调相机与换流站其他无功补偿设备配合等方面，提出了调相机的运行控制策略。

(1) 将调相机接入近区 AVC 系统，由调度中心统一调配。正常运行方式下，系统电压控制和调节应主要依靠系统原有的无功补偿设备(并联电容器/电抗器等)。国庆、春节等极端方式下，电压控制和调节存在困难，调相机可适当参与系统电压控制，但应保障其在故障后拥有充足的动态无功储备。

(2) 调相机的稳态运行点设置应满足交流故障后调相机的迟相动态无功储备需求。稳态运行时不建议调相机发出过多迟相无功，以保障交流系统故障后调相机的无功出力可快速大幅增加、支撑换流站交流母线电压的快速恢复，减少直流发生换相失败的范围和次数，避免发生连续换相失败甚至闭锁。

(3) 调相机的稳态运行应在迟相无功出力模式。换流站近区电网电压水平较高，直流闭锁后暂态过电压问题突出，对调相机的进相动态无功要求较高，因此调相机在满足交流故障后调相机的迟相动态无功储备的前提下，需保留适当的进相无功储备。

(4) 调相机应采用静态调差系数较小的控制模式，或采用定无功控制模式。由于调相机安装于换流站高压母线，如其参与直流无功调节，则在 HVDC 交流滤波器投切期间，将频繁调用调相机的动态无功储备，而这两种控制模式可控制换流站无功补偿设备动作期间调相机的无功输出。

## 5 结论

本文针对多直流馈入的江苏电网大受端系统，从多馈入短路比、电压稳定、直流换相失败和短路电流等方面，全面分析了加装调相机对电网运行的影响，为同步调相机在江苏电网的配置提供有效的理论依据，同时对调相机的运行控制策略进行了探讨，以充分发挥其调节能力。主要结论有：

(1) 调相机可提高直流多馈入短路比。加装调相机后, 落点江苏的直流换流器母线多馈入短路比/有效短路比均有所提升, 提高了受端电网电压支撑能力和接受直流功率的能力。

(2) 调相机可提高受端系统电压稳定性。加装调相机后, 正常运行、 $N-2$ 、直流闭锁方式下, 江苏电网静态电压稳定裕度均有所提高; 调相机具备稳态进相/迟相无功补偿功能, 可对换流站近区母线稳态电压进行有效调节; 调相机在故障后向系统提供快速动态无功支撑, 助力系统电压恢复和直流输电功率恢复, 提高系统暂态电压水平。

(3) 调相机可改善 HVDC 换相失败特性。加装调相机后,  $N-1$  和  $N-2$  交流故障造成雁淮、锡泰和锦苏特高压直流换相失败范围及次数均有减少(约 20%~30%)。

(4) 调相机对短路电流水平有一定助增作用。调相机对近区 500 kV 母线短路电流的助增作用比 220 kV 侧更为显著, 可提升 500 kV 母线短路电流水平最大约 5.4~6.1 kA(武南变三相/单相), 提升 220 kV 侧母线电压水平最大约 1.1 kA(吴江变), 采取短路电流控制措施后, 不影响电网的稳定运行。

(5) 提出了将调相机接入近区 AVC 系统由调度中心统一调配, 调相机稳定运行点应设置在适当的迟相运行模式, 采用静态调差系数较小的控制模式或定无功控制模式等运行控制策略, 以充分发挥调相机的动态无功支撑作用。

## 参考文献

- [1] 李俄昌. 多直流馈入受端电网电压特性分析与控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [2] 朱鑫要, 王惟源, 汪成根. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 39-42.  
ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [3] 刘建坤, 胡亚山, 赵静波, 等. 特高压接入对江苏电网的影响展望[J]. 江苏电机工程, 2010, 29(1): 1-3.  
LIU Jiankun, HU Yashan, ZHAO Jingbo, et al. Prospects to the influences of the ultra high voltage grid on Jiangsu power system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2010, 29(1): 1-3.
- [4] 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.
- [5] 蔡晖, 张文嘉, 祁万春, 等. 调相机接入江苏电网后的适应性研究[J]. 电力电容与无功补偿, 2017, 38(3): 23-27.  
CAI Hui, ZHANG Wenjia, QI Wanchun, et al. Study on adaptability of phase modifier access to Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 23-27.
- [6] 赵一琰, 华文, 邓晖, 等. 调相机接入对浙江电网的影响研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(1): 8-12.  
ZHAO Yiyan, HUA Wen, DENG Hui, et al. Research on the impact of synchronous condenser on Zhejiang Power Grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(1): 8-12.
- [7] 张宁宇, 刘建坤, 周前, 等. 同步调相机对直流逆变站运行特性的影响分析[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3): 17-20.  
ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Analysis on the impact of synchronous condenser on DC inverter operating characteristic[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 17-20.
- [8] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 44-50.  
SHI Xiangjian, MU Wei, HAN Jiao, et al. Research on control strategy of large synchronous condensers[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 44-50.
- [9] MOURSİ M E, SHARAF A M, EI-ARROUDI K. Optimal control schemes for SSSC for dynamic series compensation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 646-656.
- [10] 周晓华, 张银, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 77-84.  
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, et al. Voltage control of static var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 77-84.
- [11] 崔挺, 沈阳武, 张斌, 等. 300 MVar 级同步调相机对湖南电网稳定的影响研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(3): 1-5.  
CUI Ting, SHEN Yangwu, ZHANG Bin, et al. Influences of 300 MVar synchronous condensers on the stabilities of Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(3): 1-5.
- [12] EL-SAADAWI M, HATATA A. A novel protection scheme for synchronous generator stator windings based on SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 257-268. DOI: 10.1186/s41601-017-0057-x.

- [13] SERCAN T, TARIK A, TORBJOM T, et al. Performance comparison of synchronous condenser and SVC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3): 1606-1612.
- [14] 李志强, 蒋维勇, 王彦滨, 等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术, 2017(4): 15-22.
- LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine Technology, 2017(4): 15-22.
- [15] 戴庆忠. 同步调相机特性及应用[J]. 东方电气评论, 2016(4): 47-51.
- DAI Qingzhong. Extensive talk on synchronous condenser[J]. Dongfang Electric Comments, 2016(4): 47-51.
- [16] 阮羚, 王庆, 凌在汛, 等. 大新型大容量调相机性能特点及工程应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 57-61.
- RUAN Ling, WANG Qing, LING Zaixun, et al. Study on the performance feature and key engineering application of new large capacity condenser[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 57-61.
- [17] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [18] 马大强. 同步调相机对电力系统静态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 1982, 2(3): 25-36.
- MA Daqiang. Effect of synchronous compensator on the steady-state stability of electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1982, 2(3): 25-36.
- [19] 李召兄, 吴丽, 苗文静, 等. 多馈入直流系统短路比和有效短路比研究[J]. 四川电力技术, 2016, 39(5): 19-25.
- LI Zhaoxiong, WU Li, MIAO Wenjing, et al. Research of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed effective short circuit ratio[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2016, 39(5): 19-25.
- [20] 刘青, 廖诗武, 姚伟, 等. 计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 7-15.
- LIU Qing, LIAO Shiwu, YAO Wei, et al. An improved effective short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system considering shunt capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 7-15.
- [21] 游文霞, 周子恒, 陈磊, 等. 基于 PSASP 的特高压直流与湖南受端交流系统相互影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 18-24.
- YOU Wenxia, ZHOU Ziheng, CHEN Lei, et al. Study on mutual influences between UHVDC and the receiving-end AC system in Hunan based on PSASP[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 18-24.
- [22] 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.
- [23] 陆翌, 刘博, 童凯, 等. 混合双馈入直流系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 5-11.
- LU Yi, LIU Bo, TONG Kai, et al. Impact of VSC-HVDC on the commutation failure immunity of LCC-HVDC in dual-infeed hybrid HVDC system[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 5-11.
- [24] 张开宇, 崔勇, 庄侃沁, 等. 加装同步调相机对多直流馈入受端电网的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 139-143.
- ZHANG Kaiyu, CUI Yong, ZHUANG Kanqin, et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 139-143.

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-01-06

作者简介:

赵静波(1982—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为大电网安全稳定分析; E-mail: 1418412034@qq.com

孟侠(1989—), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析; E-mail: mxbetter@163.com

朱鑫要(1987—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析。E-mail: xy\_zhu@foxmail.com

(编辑 许威)