

[电力系统]

# 分布式调相机组电气主接线方案研究

文/张占龙 李杰 况一帆 王杰 任非凡 吕海勇 李毅

中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司；河北省电力勘测设计技术创新中心

电气主接线方案对于调相机配电装置布置、运行可靠性及工程经济性均具有重要意义。通过研究不同容量、结构分布式调相机典型参数及归纳总结典型主接线方案特点，在短路电流计算的基础上针对不同主接线方案进行可行性及经济对比分析，最终得到适用于不同场站建设条件及机组容量组合方式下的分布式调相机主接线推荐配置方案。

随着以“高比例可再生能源、高比例电力电子设备”为特征的新型电力系统高速发展，导致系统扰动及故障过程动态特性发生深刻变化<sup>[1]</sup>，由此引发的电压、频率稳定性等问题成为制约新能源消纳的重要因素。新能源分布式调相机具有系统简单、集成度高和调节性能好等优点，既能发挥系统动态无功储备的作用，又能为新能源电站提供次暂态、暂态的全过程电压支撑，可解决区域新能源送出能力受暂态电压和多场站短路比偏低制约的问题；同时作为转动机械设备，分布式调相机可提供一定的惯量响应，减小频率跌落速率。凭借上述优势，分布式调相机正逐渐成为新能源集中区域的场站标配。

分布式调相机系统电气主接线方案对于电气设备选择、配电装置的布置、二次接线、继电保护及自动化装置的配置，运行的可靠性、灵活性及安全性都有着重大影响，直接关系到所在电力系统的安全、稳定及经济运行。

当前分布式调相机实际应用处于起步阶段，主接线方案的研究较少，文献[2]基于50 MVar调相机对两种典型主接线方案进行对比分析，但所选10 kV配电装置基于常规开关设备，未考虑短路电流分断能力影响，结果存在较大偏差。

在研究及总结分析已有实际工程的基础上，本文首先分析列举了不同容量分布式调相机关键参数，并对各种典型可行性主接线方案进行特点分析；在此基础上通过短路电流计算分析选取各主接线方案中开关设备参数，并进行技术可行性及经济性分析，最后给出不同场站建设条件及建设容量规模组合方式下的最优电气主接线推荐方案。

## 分布式调相机系统关键参数

### 1. 分布式调相机关键参数

分布式调相机均为同步电动机，目前市场主流产品的单机容量分为10 MVar、20 MVar、30 MVar及50 MVar，机组出口电压均为10.5 kV，经主变压器升压至35 kV后接入新能源场站35 kV汇流母线。基于分布式调相机的功能定位及新能源场站安装运行的场所特点，电网及场站运维对于分布式调相机的要求为“暂态性能优、过载能力强、安全高可靠、易安装运维”，其中暂态性能优为其核心要求。根据文献[3]研究成果，调相机动态性能优化的关键技术参数措施首要在于尽可能降低直轴次暂态电抗 $X_d''$ 及主变压器短路电抗 $X_k$ ，其直接影响故障初始阶段分布式调相机向系统提供短路电流及动态无

功支撑，同样对电气设备参数及主接线方案选取具有重要影响。

根据调研国内主流分布式调相机生产厂家，各容量隐极及凸极分布式调相机直轴次暂态电抗参数见表1。

表1 分布式调相机直轴次暂态电抗典型参数

| 调相机结构 | 调相机容量/MVar |      |       |      |
|-------|------------|------|-------|------|
|       | 50         | 30   | 20    | 10   |
| 隐极(%) | 6.91       | 8.34 | 6.992 | 6.75 |
| 凸极(%) | 7.2        | 6.9  | 7.1   | 7.5  |

注：为使后续短路电流计算结果可靠，表格中直轴次暂态电抗参数选取不同厂家对应参数的最小值。

## 2. 调相机升压主变压器关键参数

为匹配分布式调相机较强的过载能力，目前在实际工程设计中通常选取升压主变压器容量为对应调相机额定容量的1.2~1.25倍；另关于调相机升压主变压器短路电抗 $X_k$ ，常规参考国标推荐值及与变压器设备厂家具体协商确定。各容量分布式调相机对应的升压主变压器容量及阻抗参数见表2。

表2 分布式调相机升压主变压器典型参数

| 升压主变压器   | 调相机容量/MVar |    |    |      |
|----------|------------|----|----|------|
|          | 50         | 30 | 20 | 10   |
| 容量(MV·A) | 60         | 36 | 25 | 12.5 |
| 阻抗(%)    | 9          | 8  | 7  | 6    |

## 分布式调相机典型主接线方案及选取原则

### 1. 分布式调相机典型主接线方案

分布式调相机辅助电气系统包含励磁系统、SFC启动系统及自身站用电系统。根据Q/GDW 11588—2016《快速动态响应同步调相机技术规范》规定：“励磁系统应具有他励通道，在SFC变频拖动过程中为调相机提供励磁；在启动完成后，应能可靠切换到自并励励磁方式”，按此规定，下文所有主接线方案全部采用自并励励磁方式；SFC启动系统及站用电系统无相关约束，可单独/成组接入场站35 kV回流母线或调相机机端10 kV母线，依据接入位置不同，主接线可变换存在多种型式。

本文依据是否设置调相机出口断路器(Generator Circuit Breaker, GCB)，将现有工程实际应用的典型主接线方案归纳分为以下两类。

#### (1) 设置GCB及10 kV配电装置

此类方案占用1~2个35 kV间隔，适用于35 kV

可用间隔受限的新能源场站扩建调相机工程，或10 kV短路水平较低时的新能源场站与调相机同步新建工程。

当设置有出口断路器时，SFC隔离变电源宜直接取自升压主变压器低压侧，而调相机站用变的设置则可依据调相机建设条件灵活调整，根据调相机站变的具体引接位置，第一类接线方案可分为三种子方案，如图1~图3所示。

三种子方案调相机站变引接位置及各自适用建设条件见表3。

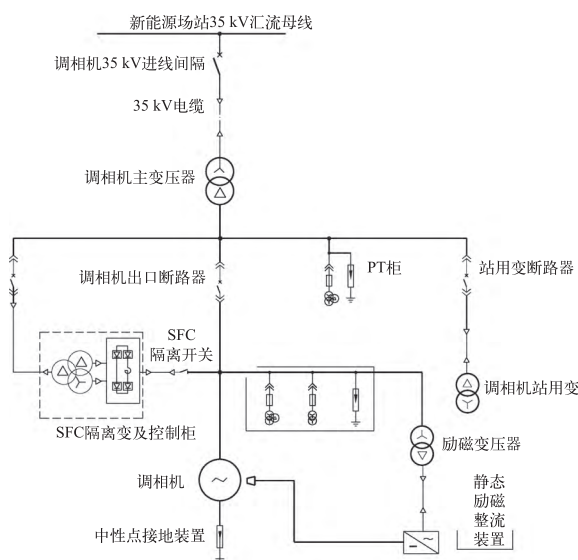


图1 含GCB电气主接线方案1-1

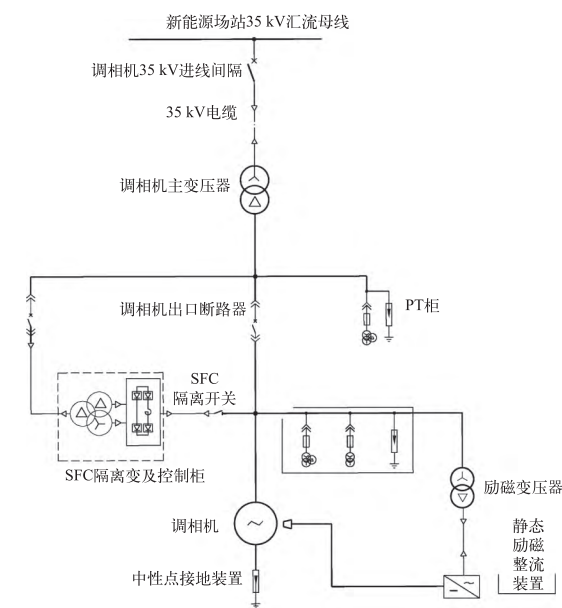


图2 含GCB电气主接线方案1-2

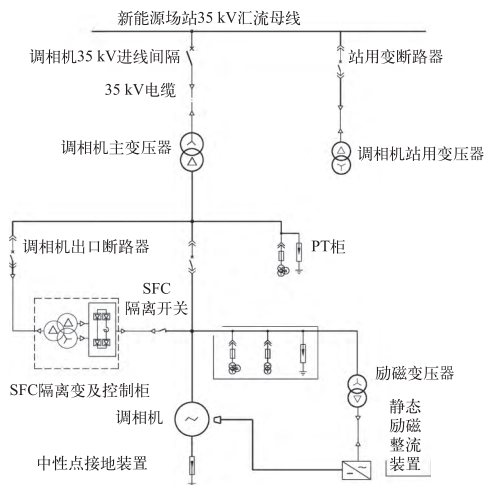


图3 含GCB电气主接线方案1-3

表3 设置GCB三种主接线子方案适用建设条件

| 子方案   | 站变方案             | 适用建设条件                                                                                  |
|-------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 方案1-1 | 引自GCB的系统侧10 kV母线 | 1) 35 kV可利用间隔受限的场站扩建调相机工程<br>2) 10 kV短路电流水平较低的场站扩建同步建设调相机工程                             |
| 方案1-2 | 与新能源场站站变合并       | 新能源场站与调相机同步新建, 10 kV分支回路短路水平高于普通断路器的开断能力时                                               |
| 方案1-3 | 引自场站35 kV汇流母线    | 1) 35 kV可利用间隔不受限的场站扩建调相机工程<br>2) 新能源场站与调相机同步新建, 要求调相机站变单独设置, 且10 kV主回路短路水平高于普通断路器的开断能力时 |

## (2) 未设置GCB及10 kV配电装置

此方案下调相机及升压主变压器以线变组型式接入35 kV母线, SFC隔离变直接由35 kV供电, 同样根据站用变设置方案不同, 第二类接线方案可分为两种子方案, 如图4、图5所示。

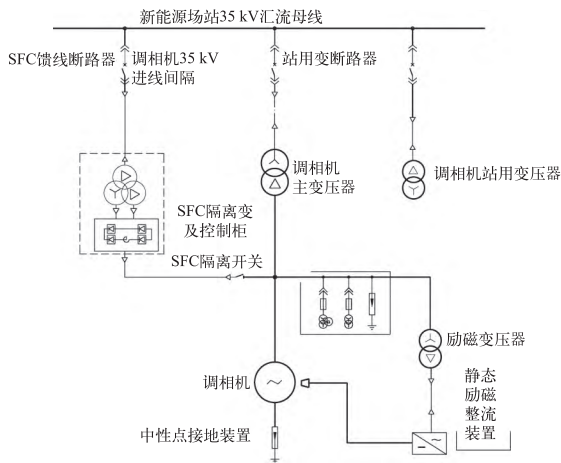


图4 无GCB电气主接线方案2-1

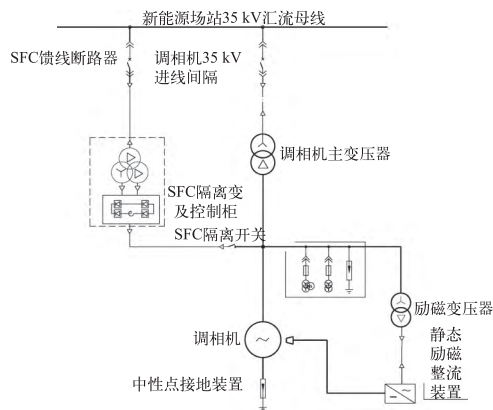


图5 无GCB电气主接线方案2-2

此类方案需占用2~3个35 kV间隔, 适用于35 kV可用间隔不受限的新能源场站扩建调相机工程, 或10 kV短路水平较高, 本类方案整体经济性占优时的新能源场站与调相机同步新建工程。两种子方案调相机站变引接位置及适用建设条件见表4。

表4 设置GCB三种主接线子方案适用建设条件

| 子方案 | 站变方案          | 适用建设条件                                              |
|-----|---------------|-----------------------------------------------------|
| 方案1 | 与新能源场站站变合并    | 新能源场站与调相机同步新建, 且10 kV主回路短路水平高于普通断路器的开断能力时           |
| 方案2 | 引自场站35 kV汇流母线 | 35 kV可利用间隔不受限的场站扩建调相机工程, 且10 kV主回路短路水平高于普通断路器的开断能力时 |

## 2. 主接线方案选取原则

分布式调相机主接线方案选取需同时考虑方案可行性及方案整体经济性。

当前分布式调相机建设分为在已有新能源场站扩建及随新能源场站同步建设两种模式。在已有新能源场站扩建时, 主接线方案选取应首先考虑可行性, 由于35 kV可利用间隔通常受限, 因此应优先采用节省35 kV间隔的接线方案; 而随新能源场站同步建设时主接线方案选择可更加多样, 35 kV间隔数量及调相机站用变设置均可灵活调整, 此时主接线方案应充分考虑方案整体的经济性。

## 分布式调相机系统短路电流计算

两种主流接线的方案差别在于是否设置调相机出口断路器及10 kV配电装置, 而10 kV各位置短路电流及其直流分量是决定10 kV断路器参数选择及主接线方案整体经济性的关键参数。本节在前述调相机系统关键参数及主接线方案1-1的基础上建立计算模型,

并计算各短路电流分量及合成值，如图6所示。

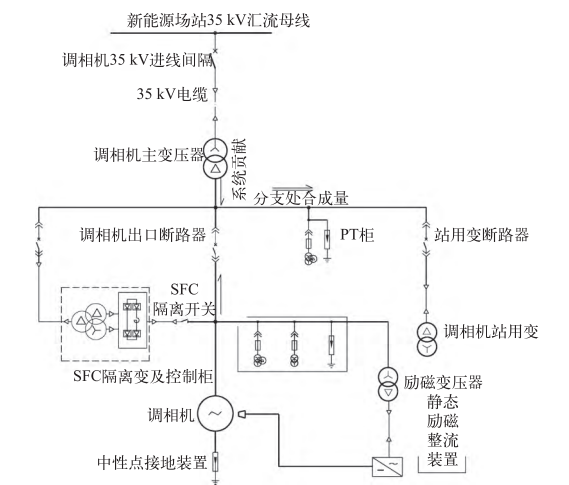


图6 短路电流计算模型及短路电流示意图

本文应用短路电流使用算法<sup>[4]</sup>分别计算隐极及凸极两种调相机结构型式下的故障点短路电流分量及合成值，计算结果见表5、表6。

表5 隐极分布式调相机短路电流计算

| 短路电流               |      | 调相机容量/MVar |       |       |       |
|--------------------|------|------------|-------|-------|-------|
|                    |      | 50         | 30    | 20    | 10    |
| 周期分量起始值/kA         | 调相机侧 | 39.79      | 19.78 | 15.73 | 8.15  |
|                    | 系统侧  | 27.56      | 20.23 | 16.68 | 10.38 |
|                    | 合成值  | 67.35      | 40.01 | 32.41 | 18.53 |
| 直流分量/kA<br>(30 ms) | 调相机侧 | 44.46      | 22.1  | 17.57 | 9.1   |
|                    | 系统侧  | 20.8       | 15.27 | 12.59 | 7.84  |
|                    | 合成值  | 65.26      | 37.37 | 32.16 | 16.94 |

表6 凸极分布式调相机短路电流计算

| 短路电流              |      | 调相机容量/MVar |       |       |       |
|-------------------|------|------------|-------|-------|-------|
|                   |      | 50         | 30    | 20    | 10    |
| 周期分量起始值/kA        | 调相机侧 | 38.19      | 23.91 | 15.49 | 7.33  |
|                   | 系统侧  | 27.56      | 20.23 | 16.68 | 10.38 |
|                   | 合成值  | 65.75      | 44.14 | 32.17 | 17.71 |
| 直流分量/kA<br>(30ms) | 调相机侧 | 42.67      | 26.71 | 17.31 | 8.19  |
|                   | 系统侧  | 20.8       | 15.27 | 12.59 | 7.84  |
|                   | 合成值  | 63.47      | 41.98 | 28.9  | 16.03 |

注：上述计算中系统侧短路电流贡献按场站35 kV母线加装调相机前短路电流为31.5 kA进行保守折算。

由上述计算结果可知，随着调相机容量及升压主变压器增大，由调相机及系统侧贡献的短路电流将逐步增大，50 MVar时10 kV分支回路的短路电流周期分量将超过10 kV普通断路器的开断能力，需选用发电机出口专用断路器；同时由于同步调相机机端等效时间常数较大，调相机提供的短路电流直流分量衰减慢，导致30 MVar及50 MVar容量时分支回路的短路

电流直流分量超过10 kV普通断路器的直流分量开断能力，同样需选用发电机出口专用断路器。

10 kV发电机出口专用断路器的设备成本远高于10 kV及35 kV普通真空断路器。因此，第一类主接线方案的经济性优势将随分布式调相机容量较大逐渐降低，且30 MVar及以上时，第二类主接线方案将占据经济性优势。

电气主接线实际工程推荐方案

在前述分析及计算的基础上，本文针对不同建设条件及机组容量组合方式下的电气主接线方案进行进一步研究：在确定建设条件下首先以方案可行性进行初步筛选，随后针对各种可行性方案进行经济对比分析，最终得到该建设条件下经济性最优的主机线推荐方案，见表7。

表7 不同建设条件下电气主接线推荐方案

| 建设调相机容量<br>建设条件       |                                | 50 MVar                                                            | 30 MVar                                               | 20 MVar                                        | 10 MVar                                        |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 调相机随<br>新能源场站<br>同步新建 | 方案2-1                          | 方案2-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)                       | 方案1-2<br>(10 kV断路器选用<br>40 kA开断水平<br>的普通断路器)          | 方案1-2<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) |
|                       |                                |                                                                    | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)          | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) |
| 在已有场<br>站扩建<br>调相机    | 1个<br>35 kV<br>间隔<br>可用        | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>80 kA开断水平<br>的发电机出口<br>专用断路器) <sup>①</sup> | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的发电机出口<br>专用断路器) | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)   | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) |
|                       | 2个<br>35 kV<br>间隔<br>可用        | 方案1-3<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的发电机出口<br>专用断路器)              | 方案1-3<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)          | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)   | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) |
|                       | 3个<br>及以上<br>35 kV<br>间隔<br>可用 | 方案2-2                                                              | 方案1-3<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)          | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>50 kA开断水平<br>的普通断路器)   | 方案1-1<br>(10 kV断路器选用<br>31.5 kA开断水平<br>的普通断路器) |

①此建设条件下方案1-1经济造价将远超正常水平，此时建议结合工程具体条件考虑增容原厂站变等特殊处理方案。

注：由于SFC系统仅在启机阶段使用，因此SFC馈线回路10 kV开关只需考虑系统侧短路电流影响，各方案中此断路器可选用40 kA开断水平的普通断路器。

## 结束语

本文通过研究不同容量、结构分布式调相机典型参数及典型主接线方案特点,在短路电流计算的基础上针对不同主接线方案进行可行性及经济性对比分析,最终得到适用于不同场站建设条件及机组容量组合方式下的分布式调相机主接线最优配置方案。

另外,表7中推荐方案基于的调相机次暂态电抗及系统侧短路电流均按短路电流最严重工况选取,因此结果偏于保守,适用于工程可行性研究、初步设计等前期阶段,工程实施阶段可依据中标设备和上级电力系统的实际参数进行短路计算及方案可行性、经济性比选,综合选取最为适用的电气主接线方案。**EA**

(收稿日期:2023-11-28)

## 参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
- [2] 李先军,方勇,李光达.新能源场站分布式同步调相机主接线及继电保护配置研究[J].农村电气化,2022(9):63-67.
- [3] 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.
- [4] 中国电力工程顾问集团有限公司,中国能源建设集团规划设计有限公司.电力工程设计手册08-火力发电厂电气一次设计[M].北京:中国电力出版社,2018.

