第49卷 第12期 2025年6月25日
DOI：10.7500/AEPS20240807002
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 12 Jun. 25，2025

基于分布式调相机的电压支撑型新能源场站构建方案
——(二)协调控制策略与试验验证

梁 浩[1]，秦 川[1]，谢 欢[1]，梁倍华[1]，吴 涛[1]，王宣元[2]，吴 龙[3]
（1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院，北京市 100045；2. 国网冀北电力有限公司电力调控中心，北京市 100054；
3. 南京南瑞继保电气有限公司，江苏省南京市 211102）

摘要： 新能源场站部署分布式调相机是提升电源侧电压支撑能力的有效措施，然而调相机目前采用“无功外环＋电压内环”级联策略接入场站自动电压控制（AVC）后制约了其低频段电压源特性。首先，文中阐述了调相机接入AVC现存的问题，提出了调相机全过程定电压需求。然后，基于含分布式调相机的新能源场站拓扑结构，解析了调相机无功电压折算系数以及无功分流影响因子关系式，提出了调相机“定电压＋无功分流抑制”接入AVC新方案，并通过调相机励磁、场站AVC双控制器硬件在环仿真验证了所提方案的有效性。最后，在某实际新能源场站完成工程化应用。现场运行结果表明，所提方案实现了场站多类型无功设备稳态调节，在有效降低场站并网点电压波动幅值的同时，充分发挥了调相机全过程电压源特性，保障了系统电压稳定裕度。

关键词： 新能源场站；分布式调相机；电压源；励磁调节器；自动电压控制；协调控制

0 引言

随着中国新型电力系统建设，新能源装机容量和占比持续高速增长。然而，新能源基地近区多缺乏支撑电源，动态无功调节能力不足，短路比低、暂态过电压等稳定问题突出[1-2]，故障下易导致新能源设备脱网，场站安全稳定运行面临风险与挑战。

同步调相机自身具有电压源特性，短时过载强励能力远大于静止无功发生器（static var generator，SVG），具备在新能源场站侧提供可靠电压支撑的潜力[3-4]。中国华北锡盟、河北承德、张家口等地区已有多个新能源场站完成分布式调相机（容量通常在50 Mvar以下）部署和挂网运行，大幅提升了新能源场站送出极限[5]。调相机有望成为新能源场站标配，应用前景广阔。

新能源场站部署分布式调相机，应使其在运行的全过程充分发挥电压源特性，即故障期间提供短路电流支撑、故障清除瞬间抑制暂态过电压、稳态运行以及故障恢复过程维持静态电压稳定。现有研究多围绕故障期间以及故障清除瞬间调相机特性开展。例如，文献[6]提出一种新能源集群等效短路比计算方法，并通过仿真与试验发现分布式调相机对于等效短路比提升效果明显。文献[7]从提升系统小干扰稳定裕度的角度提出了调相机优化选址方法与配置方案；文献[8-10]阐释了新能源场站分布式调相机在系统大扰动故障下的功角失稳机理与影响因素，可以为调相机配置及运行控制提供理论指导。文献[11-12]提出了调相机励磁参数优化模型，提高调相机动态无功输出，改善风机穿越特性。然而，针对稳态运行以及故障恢复过程中调相机调节特性分析未见相关研究。

此外，新能源场站分布式调相机还要求接入场站自动电压控制（automatic voltage control，AVC）系统，与风机、光伏、SVG等设备共同参与场站并网点电压调节。文献[13]将新能源基地的无功协调控制分为无功协调优化与实时电压支撑2个阶段，使不同类型无功设备在系统的不同阶段发挥应有作用。文献[14]提出了一种场站设备稳态时无功电压控制策略，在各设备机端电压越限时切为定电压控制，在机端电压未越限时保持无功闭环调节。现有研究主要将调相机近似等同于SVG参与AVC调节，根据系统、调相机异常工况状态信号进行闭锁、切换等策略设计，很少关注两者由于设备属性和控制方式不同在参与AVC调节过程中的差异。

在实际工程中，新能源场站沿用了特高压直流换流站大型调相机接入AVC的控制策略[15-17]，即

收稿日期：2024-08-07；修回日期：2024-12-31。
上网日期：2025-03-18。
国网冀北电力有限公司科技项目：“含新型同步调相机的构网型新能源场站协调控制技术研究”（B3018K240005）。

“无功外环+电压内环”的级联控制方法，正常运行时接收AVC的无功指令，通过无功外环进行无功闭环调节，系统故障期间通过母线电压越限等条件闭锁无功外环，通过电压内环实现快速调节。然而，通过本系列论文首篇[18]研究可知，调相机采用级联无功外环策略后，在低频段将不再呈现电压源特性，即日常参与AVC调节过程呈现电流源特性，且在故障清除后AVC仍通过调相机无功外环执行故障前指令（调节周期一般为15～30 s），不利于系统稳定恢复。

针对上述问题，本文阐述了调相机接入场站AVC现存问题，解析了调相机无功电压折算系数以及无功分流影响因子关系式，提出了一种调相机以“定电压+无功分流抑制”接入AVC的实现方案，可兼顾调相机全过程电压源特性以及新能源场站多类型无功设备稳态无功协调分配。通过构建的调相机励磁、场站AVC双控制器硬件在环仿真平台验证了方案的优越性，并在某300 MW风电场站2台50 Mvar分布式调相机实现工程化应用，为充分发挥分布式调相机全过程电压支撑作用提供了解决方案。

1　分布式调相机接入AVC常规方案

目前，新能源场站已投运调相机主要采用“无功外环+电压内环”方案接入AVC，以下称为常规方案，图1为某场站典型实现方式。图中：Q_{ref}为AVC下发至调相机的无功指令；Q_t为调相机无功测量值；K_Q为调相机无功外环增益；s为拉普拉斯变量；T_i为调相机无功外环积分时间；U_{ref}为机端电压给定值；U_t为机端电压测量值；U_f为励磁电压。内环为调相机励磁控制器典型机端电压闭环控制，由U_{ref}与U_t的偏差量经高增益比例-积分-微分（PID）控制实现快速响应调节。外环为无功功率闭环控制，由Q_{ref}与Q_t的偏差量经过比例、积分环节实现无功功率调节，该环节可在励磁控制器实现，也可在调相机监控系统实现。

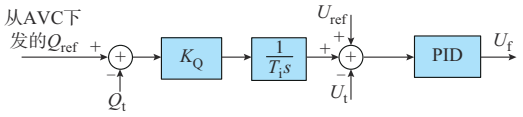

图1　调相机采用“无功外环+电压内环”方案接入AVC的原理图

Fig. 1　Schematic diagram of synchronous condenser integrated into AVC by using scheme of “reactive power outer loop + voltage inner loop”

基于上述典型结构可知：

1）调相机的定电压控制与定无功控制采用级联方式，即在AVC进行无功调节过程中，定电压环节全程发挥作用，这与新能源机组、SVG等其他电力电子设备的“正常定无功、故障定电压”不同，没有无功/电压控制方式切换逻辑。

2）调相机的定无功控制为闭环调节，即在接收AVC的指令周期内，一直调节无功功率维持无功目标值，这与传统发电厂AVC子站“半开环”调节机组无功方式不同。例如，火电厂AVC子站单个AVC指令周期内，仅发出一次、单个增/减磁脉冲指令（脉冲宽度一般为0.5～1 s，调节周期约为8～15 s）送至励磁控制器，改变图1中U_{ref}值，实现机组无功调节，发电机虽然维持在新的机端电压（无功功率）工况运行，但全过程为电压源特性。

可见，调相机采用常规方案接入AVC，其实是假设在每个AVC调节指令周期内系统的运行工况维持不变。但在新能源有功出力变化、系统故障等工况下，只要AVC采集不到母线电压越限等极端闭锁条件，调相机仍通过无功外环接收AVC前一时刻指令，导致AVC过度干预了调相机自身电压调节，制约了调相机全过程电压源特性。

2　常规方案引发电压稳定问题及机理分析

2.1　调相机级联无功外环电压稳定问题机理分析

以含调相机、SVG、风机的典型新能源场站送出场景为例，拓扑如图2所示。图中：E_{sc}为调相机机端电压；Q_{sc}为调相机机端无功功率；X_{sc}为调相机升压变压器电抗；Q_a为调相机升压变压器高压侧无功功率；Q_{SVG}为SVG无功功率；P为风机送出有功功率；U为35 kV母线电压；X为场站主变压器与送出线路的系统电抗；E为无穷大系统处电压。

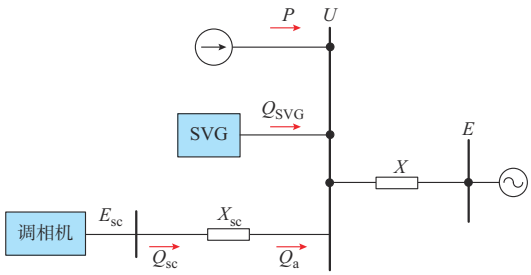

图2　新能源场站送出场景典型拓扑

Fig. 2　Typical topology of outputting scenario of renewable energy station

35 kV母线有功功率P_0与调相机经升压变压器后的并网点电压U_0的PV曲线如图3所示。在P_0处分别作2条PV曲线的切线，如图3中绿色虚线和紫色虚线所示，斜率分别为K_1和K_2。根据本系列论文首篇[18]可得，调相机采用不同控制方式时对于场站送出能力提升效果不同。

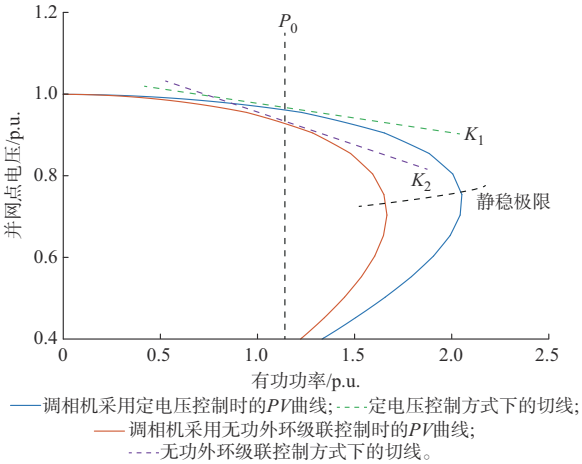

图3　调相机采用不同控制方式的*PV*曲线

Fig. 3　*PV* curves of synchronous condenser using various control modes

进一步分析图3可知，当新能源场站出力确定后，斜率K_2的绝对值始终大于K_1，可以表征两方面的问题：

1)小扰动情况下，新能源场站相同的有功功率波动幅度下，调相机级联无功环时造成并网点电压的波动幅度更大，且随着有功功率增大更为明显。

2)当新能源场站出力较大时，场站相同的功率扰动下，调相机级联无功环时更容易达到静态稳定极限，引发新能源设备反复低电压穿越，甚至脱网等严重故障，对场站的安全稳定运行造成严重威胁。

2.2　调相机常规方案接入AVC引发电压稳定问题

附录A图A1记录了某300 MW新能源场站配置2台50 Mvar分布式调相机运行时的波形数据，期间2台调相机均以常规方案运行，现场默认无功环控制参数K_Q=2 p.u.、T_i=30 s。由图可知，调相机级联无功外环时，无功功率维持在−2 Mvar附近恒定，而此工况下220 kV母线电压最大波动幅度超过3 kV，调相机机端电压则跟随场站220 kV母线电压波动超过0.15 kV，趋势基本一致。可见，调相机常规方案下呈现*PQ*节点特性，未充分发挥电压源特性以抑制场站并网点电压波动，不利于场站的电压稳定，进而易导致AVC调节合格率下降。若场站运行工况发生变化而未触发AVC闭锁条件，调相机保持上一时刻的无功指令，则将无法合理支撑并网点电压变化，易导致风机、SVG装置进入低电压穿越等暂态过程，系统的整体稳定裕度下降。

因此，为提升新能源场站并网点的电压支撑强度，提高场站的安全稳定裕度，调相机需考虑全过程采用定电压控制方式运行。

3　调相机“定电压+无功分流抑制”接入AVC实现方案

3.1　调相机定电压控制下的灵敏度分析

调相机采用定电压控制方式接入AVC运行，需要考虑两方面问题：1)需要将AVC下发给调相机的无功指令转化为电压指令，叠加至调相机励磁控制器电压主环；2)由于调相机定电压控制，场站风机、SVG等设备调节无功功率时，其中部分无功功率会从35 kV分流至调相机侧。为此，需在AVC调节其他无功设备时的同时给调相机下发相应补偿指令，使其无功功率保持调节前水平，达到抑制无功分流的效果。

设调相机无功功率变化量与机端电压变化量折算系数为K_{QU}，即调相机机端电压E_{sc}对调相机无功功率Q_{sc}的灵敏度系数；设场站其他无功设备调节无功功率对调相机的无功分流影响因子为K_{com}，即调相机无功功率Q_{sc}对SVG无功功率Q_{SVG}(以SVG为例)的灵敏度系数。

结合图2，传输线路需要满足的代数方程为：

$$P^2+\left(\frac{U^2}{X}-Q_{SVG}-Q_a\right)^2=\frac{E^2U^2}{X^2} \tag{1}$$

调相机支路满足下列关系：

$$Q_a=Q_{sc}-\frac{Q_{sc}^2}{E_{sc}^2}X \tag{2}$$

则E_{sc}、Q_{sc}、Q_{SVG}满足如下方程式：

$$U^4-\left[E^2+2X\left(Q_{SVG}+Q_{sc}-\frac{Q_{sc}^2}{E_{sc}^2}X\right)\right]U^2+X^2P^2+X^2\left(Q_{SVG}+Q_{sc}-\frac{Q_{sc}^2}{E_{sc}^2}X\right)^2=0 \tag{3}$$

令系统电压E=1 p.u.，选择稳态运行点为E_{sc}=1 p.u.，Q_{sc}=0 p.u.，Q_{SVG}=0 p.u.，则推导调相机无功功率Q_{sc}变化引起机端电压E_{sc}变化的灵敏度为：

$$\frac{\partial E_{sc}}{\partial Q_{sc}}=\frac{(4U^3-2U)\left(\frac{X_{sc}}{E_{sc}}\right)+2XU^2}{4U^3-2U}=\frac{X_{sc}}{E_{sc}}+\frac{XU}{2U^2-1} \tag{4}$$

推导SVG注入无功功率Q_{SVG}引起调相机无功功率Q_{sc}变化的灵敏度为：

$$\frac{\partial Q_{sc}}{\partial Q_{SVG}}=\frac{X}{X_{sc}}\cdot\frac{-\left(\frac{X}{X_{sc}}+1\right)U+\frac{X}{X_{sc}}}{2\left(\frac{X}{X_{sc}}+1\right)^2U^2-3\left(\frac{X}{X_{sc}}+1\right)\frac{X}{X_{sc}}U+\left(\frac{X}{X_{sc}}\right)^2-1} \tag{5}$$

2个灵敏度参数随系统阻抗及有功出力变化趋势如附录A图A2所示。由图可知，随着电网阻抗的增大，2个灵敏度系数均变大，现场实际系统阻抗变化范围相对较小，对灵敏度系数整定的影响不大。与此同时，当电网阻抗较小时，有功功率的变化对灵敏度系数影响不大，一般不超过20%；当电网阻抗较大时，有功功率增加会导致2个系数增大。因此，在电网强度较弱时，需结合现场实际考虑灵敏度系数的适应性。

3.2　调相机接入AVC新方案：定电压+无功分流抑制

为实现调相机全时间尺度定电压，同时避免站内其他设备无功调节引发的无功分流问题，本文基于调相机无功电压折算系数以及无功分流影响因子机理分析，并综合考虑工程实际，提出了调相机"定电压+无功分流抑制"接入AVC新方案，以下简称为新方案，如图4所示。

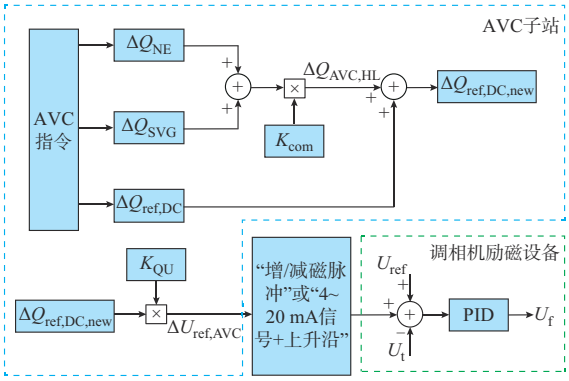

图4　调相机采用"定电压+无功分流抑制"方案接入AVC的原理图

Fig. 4　Principle diagram of synchronous condenser integrated into AVC by using scheme of "constant voltage + reactive power shunt suppression"

1)AVC下发给调相机的无功增量指令$\Delta Q_{ref,DC,new}$包括两部分：一部分是AVC分配到调相机自身的无功增量指令$\Delta Q_{ref,DC}$，另一部分是AVC下发给新能源机组、SVG无功增量指令$\Delta Q_{NE}+\Delta Q_{SVG}$时引发的调相机无功分流影响值$\Delta Q_{AVC,HL}$。通过在$\Delta Q_{ref,DC}$上叠加$\Delta Q_{AVC,HL}$，保证了AVC调节新能源机组和SVG前后调相机运行工况的一致性。

2)新能源机组、SVG的无功调节引发调相机的无功影响值可通过无功分流影响因子K_{com}折算。部分新能源场站内包含2段甚至3段35 kV母线，可设计2个无功分流影响因子$K_{com,self}$和$K_{com,mutual}$，其中，$K_{com,self}$为本侧35 kV母线上其他无功设备接收AVC指令调节无功功率对本侧调相机的影响因子，而$K_{com,mutual}$为对侧35 kV母线上无功设备接收AVC指令调节无功功率对本侧调相机的影响因子。

3)调相机采用定电压控制方式实现AVC的无功调节指令，即AVC子站下发给调相机的总无功增量指令$\Delta Q_{ref,DC,new}$通过标幺化后经折算系数K_{QU}变为电压增量指令$\Delta U_{ref,AVC}$，在AVC每个调节周期的初始时刻以"增/减磁脉冲"或"4~20 mA信号+上升沿"的形式送至励磁控制器。这样，在调相机初始时刻更新机端电压给定值到下一个AVC调节指令下发期间，调相机一直维持电压闭环控制。

系统正常运行中，AVC调节新能源机组或SVG时，调相机的$\Delta U_{ref,AVC}$会进行更新，补偿其定电压方式下自身无功功率的反向调节；AVC调节调相机时，与原策略无功外环控制效果相同，只是将无功指令折算成电压指令；系统发生扰动过程中，调相机收到的指令$\Delta U_{ref,AVC}$没有更新，AVC不会对调相机的电压源特性造成影响。

AVC子站已包含了实现本方案的各设备无功功率指令和无功功率实测值，只需策略开发后将影响因子K_{com}和折算系数K_{QU}整定输入AVC子站程序即可。

3.3　影响因子K_{com}和折算系数K_{QU}现场整定方法

K_{com}、K_{QU}主要受新能源场站内变压器、系统电抗等影响，若已知场站内有功出力、35 kV电压等采集量，可根据式(4)与式(5)进行计算。在实际工程应用中，可通过多次记录新能源机组或SVG无功功率变化时调相机的无功功率变化量ΔQ_{DC}，求取影响因子K_{com}的平均值，方法如下：

1)AVC系统临时退出，新能源机组、SVG定无功运行，调相机定电压运行。

2)进行新能源机组或SVG无功指令阶跃扰动。以SVG为例，无功指令从$Q_{ref,SVG1}$变为$Q_{ref,SVG2}$，记录SVG无功功率变化量ΔQ_{SVG}以及调相机无功功率变化量ΔQ_{DC}。

3)根据式(6)计算无功分流影响因子K_{com}。

$$K_{com}=\frac{\Delta Q_{DC}}{\Delta Q_{SVG}} \tag{6}$$

4)重复试验，计算N次无功分流影响因子$K_{com,1}$，$K_{com,2}$，…，$K_{com,N}$，求取平均值。

通过改变调相机机端电压参考值，多次记录调相机机端电压变化量ΔU_{DC}及对应的无功功率变化量ΔQ_{DC}，求取机端无功电压灵敏度系数K_{QU}的平均值，方法如下：

1)AVC系统临时退出，新能源机组、SVG定无功运行，调相机定电压运行。

2)进行调相机机端电压指令阶跃扰动，机端电压指令从$U_{ref,DC1}$变为$U_{ref,DC2}$，记录调相机的机端电

压变化量 ΔU_{DC} 以及调相机的无功功率变化量 ΔQ_{DC}。

3)根据式(6)计算机端无功电压灵敏度系数 K_{QU}。

$$K_{QU}=\frac{\Delta U_{DC}}{\Delta Q_{DC}} \tag{7}$$

4)重复试验，计算 N 次折算系数 $K_{QU,1}$，$K_{QU,2}$，…，$K_{QU,N}$，求取平均值。

4　新方案程序开发及硬件在环验证

基于国内某型号AVC子站控制器和调相机励磁控制器完成新方案程序开发与功能固化，并在仿真测试系统中开展硬件在环测试，测试环境见附录A图A3。参考3.3节方法，基于仿真系统对 K_{com} 和 K_{QU} 进行整定，K_{com}=0.437 1 p.u.，K_{QU}=0.003 8 kV/Mvar。

4.1　调相机接入AVC调节特性与分配策略验证

投入AVC功能，风机、SVG、调相机并网运行，AVC常规采用风机(出力上限设为5 Mvar)、SVG(出力上限设为5 Mvar)、调相机(出力上限设为5 Mvar)的优先级进行无功分配。AVC设定220 kV母线电压指令由225.04 kV变为228.04 kV，调相机接入AVC不同方案下调节过程如附录A图A4所示。由图可知，新方案与常规方案均是按照既定策略和设备无功裕度调节，先调节风机，再调节风机+SVG，最后调节SVG+调相机，且均在3次将220 kV电压调节到位，验证了新方案调节速度与调节精度的正确性。

此外，由于新方案的无功分流抑制策略，在AVC调节风机、SVG时，调相机同步进行了无功补偿，调节前后调相机无功功率基本维持不变，实现了场站AVC多类型无功设备协调控制。

4.2　系统故障及恢复过程调相机支撑能力验证

模拟500 kV系统线路三相永久性 $N-1$ 故障，调相机接入AVC不同方案下场站运行情况如图5所示。本次仿真考虑了新能源设备低电压穿越，当风机机端电压小于0.9 p.u.时，风机进入低电压穿越状态，减少有功出力、增加无功出力；当风机机端电压大于0.94 p.u.时，低电压穿越退出，增加有功出力，其间有功功率恢复速率为0.25 p.u./s。

由图5可知，故障发生瞬间，风机进入低电压穿越状态，调相机迅速发出无功功率抬升电压。常规方案故障清除后调相机维持前一时刻AVC指令进行减磁，造成调相机机端电压下降，进而导致风机反复低电压穿越；新方案中调相机呈现了全过程电压源特性，在AVC子站下一个调节周期指令下发前维持了机端电压恒定，不受接入AVC逻辑影响，发出

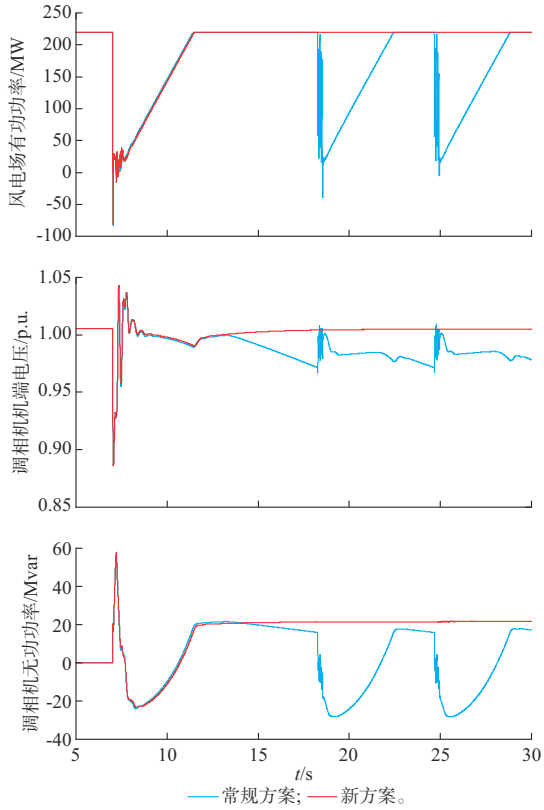

图5　系统线路三相永久性 $N-1$ 故障下调相机接入AVC不同方案调节效果对比

Fig. 5　Adjustment effect comparison of various schemes for synchronous condenser integrated into AVC under three-phase permanent $N-1$ fault of system line

系统所需无功功率，防止了系统电压下降引发新能源设备再次进入低电压穿越，保障了故障恢复后场站的稳定运行。

4.3　调相机抑制稳态运行场站电压波动效果验证

模拟风电场站风速周期性波动，风机出力变化，进而引发场站电压波动。调相机接入AVC新方案与常规方案下220 kV母线电压波动情况如附录A图A5所示，2种方案下风电场有功功率的波动幅度与频率相同。由图A5可知，新方案全时间尺度呈现出电压源特性，通过调相机定电压的控制有效抑制了220 kV母线电压的波动幅度，幅值平均值从常规方案的5.44 kV降为了新方案的3.63 kV，更有利于场站电压稳定，可有效提高新能源场站AVC母线电压调节合格率。

5　新方案现场测试及应用

在中国河北承德地区某300 MW风电场开展了2台50 Mvar调相机“定电压+无功分流抑制”新方案接入AVC改造与试验验证，场站拓扑及相关参数见附录A图A6。

5.1　调相机以新方案接入AVC调节特性验证

本文完成了新方案软件、硬件改造以及2台调相机K_{com}、K_{QU}系数整定，开展了接入AVC性能的验证试验。

AVC投入运行，给风机、SVG下达无功指令调节场站220 kV母线电压，观察调相机侧无功分流情况，如图6所示。

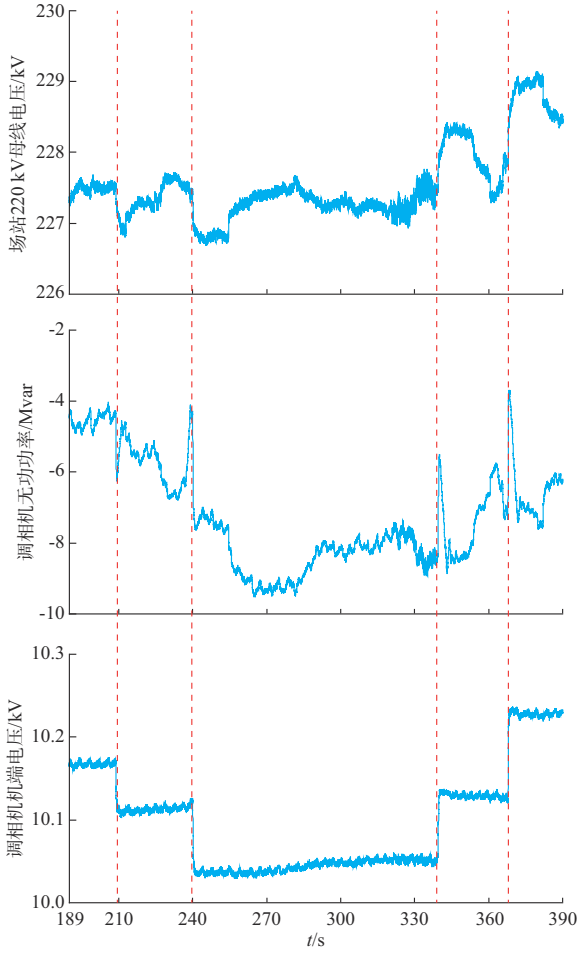

图6　调相机采用新方案接入AVC无功分流情况

Fig. 6　Reactive power shunt of synchronous condenser integrated into AVC by using new scheme

结合图6，AVC给风机、SVG总共下发了4次无功指令（如图6中红色虚线所示），前2次为减少无功功率，使场站220 kV母线电压降低，此过程调相机也根据AVC指令进行了减小机端电压的调整；后2次为增加无功功率，使场站220 kV母线电压升高，此过程调相机也根据AVC指令进行了增大机端电压的调整。由图6可见，在AVC调节其他设备无功功率的4次指令时刻前后，调相机的无功功率基本保持不变，说明调相机在呈现电压源特性的同时进行了无功分流抑制，验证了影响因子K_{com}和折算系数K_{QU}的正确性。

AVC投入运行，取两天相同时刻（00:00—06:00），不同方案220 kV母线电压调节情况如附录A图A7所示，新能源场站并网点电压目标是AVC结合当前运行状态下发的，故两天同时刻电压曲线有所差异。其中，图A7(a)为改造前的常规方案，图A7(b)为改造后的常规方案。对比图A7(a)、(b)可知，首先，调相机以新方案接入AVC后，AVC可以正常跟随母线电压指令调节母线电压，不影响AVC调节与分配策略；其次，在采用新方案时220 kV母线电压在目标值上下波动幅度明显减小，有利于提升AVC调节合格率。

5.2　稳态工况不同方案电压支撑特性对比

结合系统需求，调相机不仅需要在暂态过程中支撑故障时低电压、抑制故障清除时过电压，而且在稳态运行期间需保持电压源特性以减小母线电压波动水平，维持静态电压稳定。

试验期间对比了采用不同方案稳态运行时调相机及场站220 kV母线电压响应特性，如图7所示，在260.2 s时刻AVC从新方案切换到常规方案运行。对比可知，调相机采用新方案，稳态期间维持机端电压恒定，220 kV母线电压的波动幅值明显低于常规方案。经1 h统计，220 kV幅值波动范围下降约56%。

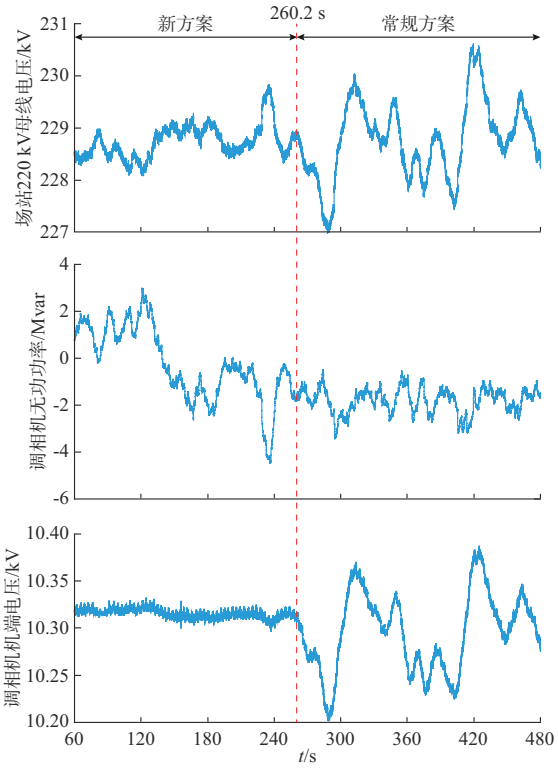

图7　稳态运行时新方案、常规方案电压支撑特性对比

Fig. 7　Comparison of voltage-supporting characteristics between new scheme and conventional scheme during steady-state operation

5.3　故障工况下采用新方案的调相机全过程电压源特性验证

调相机采用新方案运行期间，系统发生单相接地故障，录波装置记录到220 kV母线电压及调相机响应过程，如图8所示。t_0时刻单相接地故障发生，母线电压从228.2 kV经34 ms跌落至205.4 kV，t_1时刻故障相跳闸，母线电压提升至232.4 kV，t_1～t_2期间非全相运行，t_2时刻单相重合闸成功。

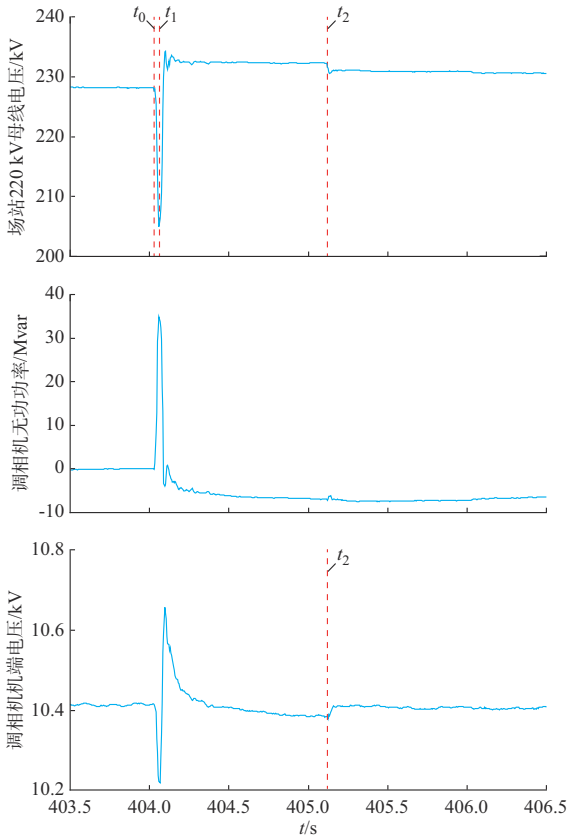

图8　系统发生单相接地故障时采用新方案的调相机响应特性

Fig. 8　Response characteristics of synchronous condenser using new scheme when single-phase-to-ground fault occurs in system

由图8可知，调相机在暂态及故障恢复的全过程中呈现了电压源效果：1)单相接地故障发生瞬间，系统电压跌落，调相机(50 Mvar容量)无功功率从0 Mvar提升至35 Mvar，提供强励支撑；2)故障相清除瞬间，系统电压提升至234.5 kV，调相机无功功率从35 Mvar下降至－3 Mvar，有效抑制系统暂态过电压；3)故障相清除后非全相运行期间及单相重合闸之后，由于母线电压较故障前抬高，调相机则维持进相状态，防止系统电压过高。

通过现场实际扰动工况及试验，充分验证了新方案下调相机的全过程电压源特性，以及参与AVC调节策略的正确性，充分发挥了调相机支撑作用，保障了风机等设备的安全稳定运行，进一步提升了新能源场站电压稳定水平。

6　结语

本系列论文首篇[18]在频域上定义了全过程短路比指标用于衡量设备控制特性对于电压稳定性的影响，并指出调相机级联无功控制外环时，在低频段不再呈现电压源特性，为系统引入潜在风险。本文在此基础上，完成了调相机接入新能源场站协调控制策略研究、调相机励磁与场站AVC双控制器硬件在环测试以及现场试验验证，进一步阐明了基于分布式调相机的电压支撑型新能源场站构建方案。主要工作包括：阐述了调相机采用“无功外环＋电压内环”常规方案引发的电压稳定问题，基于调相机无功分流及无功电压灵敏度分析，设计了调相机“定电压＋无功分流抑制”接入AVC的实现方案，即调相机采用定电压控制方式，呈现出全过程电压源特性，发挥其无功电压支撑潜能，并通过无功分流影响因子整定补偿AVC调节场站其他设备对调相机无功功率的影响，实现了调相机与新能源、SVG等站内设备协调配合。

本文方案控制原理清晰、工程实践可行，已在国内主流AVC子站、调相机励磁控制器设备完成程序开发，并在某300 MW风电场2台50 Mvar分布式调相机完成工程化应用。现场试验与运行结果表明，本文方案充分发挥了新能源场站配置分布式调相机的预期作用，兼顾了场站电压暂态支撑与稳态调节需求，实现了场站内多类型无功源的协调控制，有效解决了新能源场站母线电压波动造成场站AVC合格率偏低问题，消除了新能源场站多类型设备间无功分流问题，降低了系统故障后稳定破坏风险。

近年来，构网型技术受到广泛关注和研究，未来将有更多的构网型新能源机组、SVG、储能等设备接入新能源场站，同样需要面临和解决自身电压源特性发挥以及与场站内其他“无功源”设备协调控制问题。本文研究为新能源场站部署构网型设备的策略制定与调度运行提供了一种新思路。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)，扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 索之闻，李晖，张锋，等.高比例新能源直流送端系统分布式调

相机优化配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(23):133-141.
SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 133-141.

[2] 马富艺龙,辛焕海,刘晨曦,等.新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J].电工技术学报,2023,38(21):5758-5770.
MA Fuyilong, XIN Huanhai, LIU Chenxi, et al. Small-disturbance system voltage support strength assessment method for renewables VSC-HVDC delivery system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(21): 5758-5770.

[3] 周莹坤,孙华东,徐式蕴,等.提升电网电压支撑强度的调相机优化配置方法[J].电网技术,2022,46(10):3848-3856.
ZHOU Yingkun, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Synchronous condenser optimized configuration scheme for power grid voltage strength improvement [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3848-3856.

[4] 郭强,李志强.同步调相机发展综述[J].中国电机工程学报,2023,43(15):6050-6064.
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6064.

[5] 王泽森,刘苗,李海波,等.提升弱电网新能源集群送出能力的调相机优化配置方法[J].电力自动化设备,2024,44(7):30-36.
WANG Zesen, LIU Miao, LI Haibo, et al. Optimal configuration method of synchronous condenser to improve delivery capacity of new energy cluster in weak grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 30-36.

[6] 朱凌志,曲立楠,刘纯,等.新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J].电力系统自动化,2021,45(22):74-82.
ZHU Lingzhi, QU Linan, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 74-82.

[7] 王康,李子恒,杨超然,等.面向大型新能源基地小干扰稳定性提升的调相机选址方法[J].电力系统自动化,2022,46(4):66-74.
WANG Kang, LI Ziheng, YANG Chaoran, et al. Siting method of synchronous condenser for small-signal stability improvement of large-scale renewable energy base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 66-74.

[8] 赵天骐,李秉芳,杨松浩,等.新能源场站分布式同步调相机暂态功角稳定性影响因素分析[J].电力系统自动化,2023,47(16):114-122.
ZHAO Tianqi, LI Bingfang, YANG Songhao, et al. Analysis of influence factors for transient rotor-angle stability of distributed synchronous condensers in renewable energy stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 114-122.

[9] 杨松浩,李秉芳,赵天骐,等.新能源场站分布式同步调相机暂态功角失稳形态及机理[J].电力系统自动化,2023,47(3):12-18.
YANG Songhao, LI Bingfang, ZHAO Tianqi, et al. Transient angle instability mode and mechanism of distributed synchronous condensers in renewable energy station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 12-18.

[10] 王彤,王潇桐,韩梓畅,等.分布式调相机暂态特性分析与暂态功角稳定性机理研究[J].电工技术学报,2025,40(1):36-51.
WANG Tong, WANG Xiaotong, HAN Zichang, et al. Research on transient characteristic analysis and transient stability mechanism of distributed condenser[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 36-51.

[11] 付敏,崔灿灿,王璐瑶,等.分布式调相机励磁系统参数优化模型研究[J].电机与控制学报,2022,26(2):102-110.
FU Min, CUI Cancan, WANG Luyao, et al. Parameters optimization model study of excitation system of distributed synchronous condenser [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(2): 102-110.

[12] 袁彬,李辉,向学位,等.考虑调相机饱和参数的分阶段励磁控制优化策略[J].电力系统保护与控制,2023,51(15):42-54.
YUAN Bin, LI Hui, XIANG Xuewei, et al. Optimization strategy of phased excitation control considering phase modulator saturation parameters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 42-54.

[13] 林俐,马笑寒,丁文敏.计及构网型储能电站的新能源基地无功协调优化控制[J].电力系统自动化,2025,49(1):59-68.
LIN Li, MA Xiaohan, DING Wenmin. Coordinated optimal reactive power control of renewable energy base considering grid-forming energy storage station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 59-68.

[14] 刘志强,窦宇宇.以提升机组电压稳定性为目标的风电场无功电压协调控制[J].内蒙古电力技术,2023,41(5):75-80.
LIU Zhiqiang, DOU Yuyu. Coordinated control of reactive voltage for wind farm aiming at improving unit voltage stability [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(5): 75-80.

[15] 巩伟峥,肖洋,夏潮,等.华东电网调相机AVC控制策略研究[J].电网技术,2020,44(8):3106-3113.
GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in East China grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3106-3113.

[16] 刘增训,李晓飞,刘建琴.含调相机的高压直流送端换流站无功协调控制策略研究[J].电网技术,2020,44(10):3857-3865.
LIU Zengxun, LI Xiaofei, LIU Jianqin. HVDC converter station reactive power coordinated control strategy with synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3857-3865.

[17] 王少雄,潘学萍,颜君凯,等.大容量调相机参与下特高压交直流电力系统稳态电压协同控制[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):120-127.
WANG Shaoxiong, PAN Xueping, YAN Junkai, et al. Coordinated control of steady-state voltage for UHVDC/AC power systems with large-scale synchronous condenser integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 120-127.

[18] 梁倍华,谢欢,赵天骐,等.基于分布式调相机的电压支撑型新能源场站构建方案——(一)机理分析[J].电力系统自动化,2025,49(11):159-167.
LIANG Beihua, XIE Huan, ZHAO Tianqi, et al. Construction scheme of voltage-supporting renewable energy station based on

distributed synchronous condensers—Part one mechanism analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(11): 159-167.

梁　浩(1987—)，男，通信作者，硕士，高级工程师，主要研究方向：发电机、调相机励磁控制系统理论分析、涉网性能检测以及现场试验等。E-mail：672442478@qq.com

秦　川(1997—)，男，硕士，工程师，主要研究方向：发电机、调相机励磁控制系统理论分析、涉网性能检测以及现场试验等。E-mail：805193108@qq.com

谢　欢(1979—)，男，博士，教授级高级工程师，主要研究方向：同步发电机与双馈异步机励磁控制系统理论分析、大电网仿真分析、网源协调等。E-mail：xiaosan_616@aliyun.com

（编辑　蔡静雯）

Construction Scheme of Voltage-supporting Renewable Energy Station Based on Distributed Synchronous Condensers—Part Two　Coordinated Control Strategy and Test Verification

LIANG Hao[1], *QIN Chuan*[1], *XIE Huan*[1], *LIANG Beihua*[1], *WU Tao*[1], *WANG Xuanyuan*[2], *WU Long*[3]

(1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 2. Power Dispatch and Control Center of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China; 3. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Deploying the distributed synchronous condenser in the renewable energy station is an effective measure to improve the voltage-supporting ability on the power supply side. However, the existing cascade strategy of "reactive power outer loop + voltage inner loop" is adopted to integrate the synchronous condenser into the automatic voltage control (AVC) of the station, which limits the low-frequency voltage source characteristics of the synchronous condenser. First, this paper describes the existing problems of the synchronous condenser integrated into AVC and proposes the constant voltage requirement for the synchronous condenser throughout the whole process. Based on the topology of the renewable energy station with distributed synchronous condensers, the reactive voltage conversion coefficient and the reactive power shunt influence factor are analyzed. Then, this paper proposes a new scheme of "constant voltage + reactive power shunt suppression" for integrating the synchronous condenser into AVC. The effectiveness of the proposed scheme is verified by the hardware-in-the-loop simulation of the dual controllers of synchronous condenser excitation and AVC at the station. Finally, the engineering application has been realized in an actual renewable energy station. The field operation results show that the proposed scheme realizes the steady-state regulation of multi-type reactive power devices of the station, effectively reduces the voltage fluctuation amplitude at the grid-connection point of the station, fully utilizes the voltage source characteristics of the synchronous condenser in the whole process, and guarantees the voltage stability margin of the system.

This work is supported by State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (No. B3018K240005).

Key words: renewable energy station; distributed synchronous condenser; voltage source; excitation regulator; automatic voltage control (AVC); coordinated control