第49卷 第11期 2025年6月10日
DOI：10.7500/AEPS20240807001
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 49 No. 11 Jun. 10，2025

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

梁倍华[1]，谢 欢[1]，赵天骐[1]，梁 浩[1]，郝 婧[1]，辛焕海[2]
（1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(源网荷储灵活运行与协调控制国家电网公司实验室)，北京市 100045；
2. 浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027）

摘要： 新能源场站配置分布式调相机可以有效提高短路比指标和系统送出能力，然而调相机控制特性对于电压支撑能力及电网强度的影响和量化评估目前较少有研究涉及。文中首先阐明了场站需要具备的全过程电压支撑功能需求，并基于频域指标对比分析了调相机在电压控制和无功外环级联控制2种策略下的电压支撑能力差异，揭示了无功外环的引入将导致调相机低频段特性转变为电流源特性，降低了故障清除后系统动态调节过程中的电压支撑能力。然后，提出了调相机接入新能源场站的全过程短路比指标，其物理意义为电压灵敏度，能够有效表征不同控制策略对于多时间尺度电压稳定性的影响，阐明了以调相机次暂态电抗参数计算运行极限的适应性。最后，通过实时数字仿真系统(RTDS)硬件在环仿真验证了分析结论的正确性。

关键词： 新能源场站；调相机；电压支撑；电压稳定性；短路比；多时间尺度；运行极限

0 引言

中国“三北”地区新能源资源丰富，新能源基地大多采用“大规模集中式开发，高电压远距离送出”的典型发展模式，风电、光伏汇集后集中接入大电网[1]。高比例新能源经交流汇集外送，存在短路电流支撑不足、暂态工频过电压[2-3]、短时/长时电压稳定等问题，新能源并网安全稳定运行面临风险，送出能力受到严重制约[4]，亟须提升电源侧全过程电压支撑能力，构建电压支撑型新能源场站，确保其在故障期间、故障清除瞬间以及故障恢复后均具有足够的电压支撑强度。

新能源场站配置分布式调相机可有效提升场站短路容量，增强系统电压和小扰动稳定性等[5-6]，进而提升新能源送出能力。文献[7]提出可以衡量交流系统强度的广义短路比(gSCR)指标，揭示了多馈入系统的小干扰稳定裕度。文献[8]提出衡量新能源机组接入电网运行强度的多场站短路比指标(MRSCR)，并广泛应用于新能源接入规模评估与运行方式安排。短路比指标因其简单、直观的优点，已成功用于冀北、华北锡盟等新能源汇集区域的分布式调相机选址定容[9-10]，显著提升了新能源交流汇集系统送出能力。

在分布式调相机实际应用中，除了利用其自身次暂态同步电压源特性之外，还需要将其纳入场站自动电压控制(AVC)系统，与其他无功补偿设备协同参与系统二次AVC。考虑到新能源场站无功源设备众多，AVC与风机、静止无功发生器(SVG)等原有设备之间采用无功指令分配模式，分布式调相机接入AVC后也默认采用了“快速电压内环+慢速无功外环”的控制模式[11-12]。然而，分布式调相机无功电压控制模式和参数的差异可能显著改变场站电压支撑特性，潜在风险和收益需要量化的方法来进行分析和评估。

在现有短路比指标计算中，同步调相机采用了内电势恒定、次暂态电抗为内阻抗的电压源表示，不能完整反映机组励磁控制系统对场站全过程电压支撑能力的影响，难以表征调相机对于系统静态、动态和暂态电压稳定的作用机理，也无法用于指导场站电压控制方式设计和参数整定。如何将调相机的控制特性与系统强度、电压稳定性的关系阐述清楚，是一个亟待解决的问题。

文献[13]定义无功电流增量在电压跌落方向上的投影与电压跌落幅值之比为衡量调相机动态无功

收稿日期：2024-08-07；修回日期：2025-01-07。
上网日期：2025-03-13。
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)。

特性的评价指标，并以此为参考分析了励磁系统的主导参数及优化方向。然而，当前的研究[13-14]主要关注调相机系统本身的无功电压响应特性，较少涉及其接入新能源场站全过程电压控制特性需求。

本文以调相机构建电压源型新能源场站为目标，从系统需求的角度，分析了场站需具备的电压支撑能力，并提出了能够反映设备控制特性的全过程短路比指标；基于该指标分析了电压级联和无功级联2种控制策略下，调相机电压支撑能力的差异，以及对场站并网点短路比的贡献，揭示了以调相机次暂态电抗参数计算运行极限的适应性；最后，基于实时数字仿真系统(RTDS)的硬件在环仿真系统验证了本文分析结果的正确性。

1　场站电压支撑需求与频域评价指标

1.1　全过程电压支撑功能需求

电网典型故障下，弱送端系统新能源场站并网点电压变化过程如图1所示，其包括故障前稳定运行、故障期间低电压、故障清除瞬间暂态过电压、故障后电压波动和稳定到新的运行点等几个过程。文献[15]介绍了该典型场景的结构和工况。

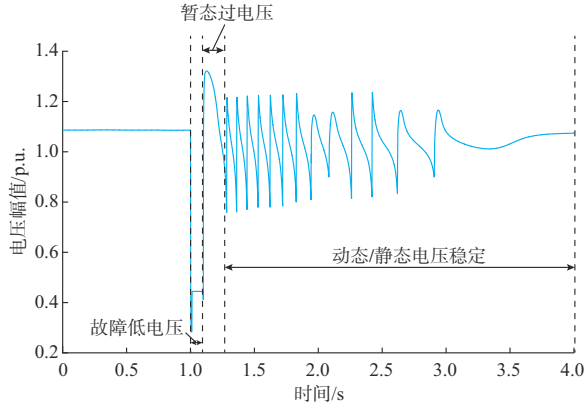

图1　新能源场站并网点电压变化过程
Fig. 1　Change process of voltage at grid-connection point of renewable energy station

构建全过程电压支撑型新能源场站，需要无功补偿设备满足以下几方面的需求。

1)静态电压稳定要求

电压支撑设备接入新能源场站首先需要提升送出系统静态电压稳定水平。文献[16]推导了电压灵敏度与短路比的关系，指出二者之间存在线性关系，并提出电压灵敏度是表征静态电压稳定约束下功率传输极限更合适的指标。对于图2所示的新能源送端系统，以送端额定容量为基准，可得送端母线电压灵敏度如下：

$$\frac{\partial Q}{\partial U}=\underbrace{\frac{1}{X}\left\{2U-\frac{E}{\sqrt{1-[XP/(EU)]^2}}\right\}}_{\text{由电网决定}}+\underbrace{\frac{1}{X_1+X_{eq}}(2U-E_{eq})}_{\text{由电压支撑设备决定}} \tag{1}$$

$$P_{max}=\frac{EU}{X}\sqrt{1-\frac{E^2}{[2U+(2U-E_{eq})X/(X_1+X_{eq})]^2}} \tag{2}$$

式中：E、U分别为送端、受端电压幅值；X为电网等效电抗；X_1为电压支撑设备到并网母线等效电抗；E_{eq}、X_{eq}分别为等效电压源的内电势与内电抗；P、Q分别为送端有功、无功功率；P_{max}为静态功率传输极限。以上各变量都是以新能源场站额定容量为基准的标幺值。

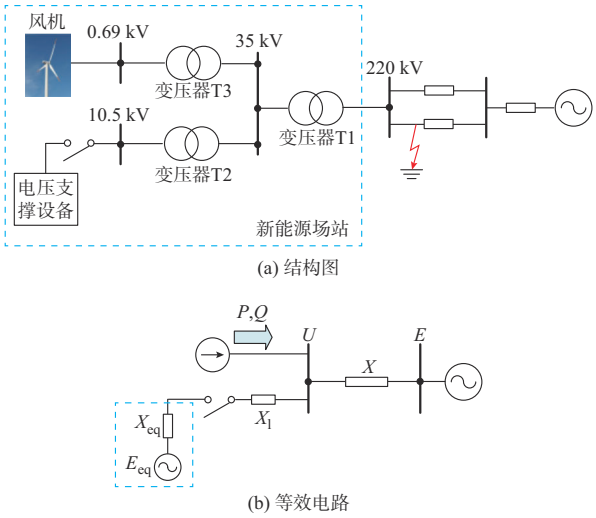

图2　新能源场站结构及等效电路
Fig. 2　Structure and equivalent circuit of renewable energy station

由式(1)可见，母线电压灵敏度由两部分组成：一部分由网侧的电压、线路阻抗和传输功率决定，另一部分由场站侧电压支撑设备的等效内电势及其到并网点的等值阻抗决定。根据式(1)绘制电压灵敏度随有功功率变化曲线(详见附录A图A1)，由曲线可见，有功功率增大，灵敏度减小，当达到有功功率送出极限时，灵敏度为零。因此，电压灵敏度大小可以表征功率传输能力。电压支撑设备的加入，可以提升电压灵敏度的数值，进而提升静态电压稳定极限。

2)抑制故障清除瞬间暂态工频过电压的需求

文献[17]分析了高比例电力电子系统在故障扰

动后引发的暂时工频过电压机理，指出无功补偿装置调节滞后性和新能源故障穿越策略响应滞后性所造成的电压恢复瞬间无功盈余是工频过电压的关键影响因素。因此，电压支撑设备需要在故障清除瞬间吸收无功盈余，降低过电压水平。

针对图2所示结构，如果场站新能源机组在故障后的无功电流盈余为Δi_{Q}，并网点电压增量为ΔU，则电压灵敏度为：

$$\frac{\Delta i_{\mathrm{Q}}}{\Delta U}=\frac{1}{X}+\frac{1}{X_{\mathrm{l}}+X_{\mathrm{eq}}} \tag{3}$$

由式(3)可以看出，过电压的大小与并网点的等效导纳有关，等效导纳越大，过电压水平越低。但需要指出的是，分析暂态工频过电压所采用的设备等效阻抗为次暂态电抗。

3)动态电压稳定要求

对于故障清除后电压恢复过程，电力电子设备的多时间尺度控制会影响并网点的动态电压灵敏度，如果灵敏度过小则电压波动增大，严重时导致新能源机组反复进出高电压穿越/低电压穿越控制[18]，危害电网安全稳定运行。

1.2　单馈入系统电压灵敏度与短路比的关系

系统电压支撑强度通常采用短路比指标衡量。一般定义短路比为：系统短路容量与电气设备容量的比值[19]。以图2为例，如果不考虑本地的电压支撑设备，则并网点短路比γ_{SCR0}为：

$$\gamma_{\mathrm{SCR0}}=\frac{S_{\mathrm{ac}}}{S_{\mathrm{N}}}=S_{\mathrm{B}}^{-1}B=\frac{1}{X} \tag{4}$$

式中：S_{ac}为短路容量；S_{N}为新能源场站额定容量；S_{B}为新能源场站额定容量与系统基准容量之比；B为以系统容量为基准的线路电纳标幺值。由上式可见，短路比指标在数值上为以新能源场站额定容量为基准时电网等值电抗的倒数。

对于图2所示系统，由于各变量采用标幺值表示，则电压灵敏度为：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U}\approx\frac{\Delta I_{\mathrm{Q}}}{\Delta U}=\frac{1}{X}=\gamma_{\mathrm{SCR0}} \tag{5}$$

式中：Δ表示相应变量的小信号扰动，下同；I_{Q}为无功电流标幺值。式(5)表明并网点电压灵敏度近似为该点短路比。

如果新能源近端有能够支撑电压的电压源型设备，则电压灵敏度为：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U}\approx\frac{\Delta I_{\mathrm{Q}}}{\Delta U}=\frac{\Delta(I_{\mathrm{cQ}}+I_{\mathrm{gQ}})}{\Delta U}=\gamma_{\mathrm{SCR0}}+\frac{\Delta I_{\mathrm{cQ}}}{\Delta U} \tag{6}$$

式中：I_{gQ}为电网侧无功电流响应；I_{cQ}为电压支撑设备的无功电流响应。此时，并网点的电压灵敏度由两部分组成：一部分由电网等效电抗决定，另一部分由电压支撑设备决定。由于实际设备动态控制特性对电压支撑能力有显著影响，$\Delta I_{\mathrm{cQ}}/\Delta U$不再是定值。为此，在频域上定义无功电流变化量与电压幅值变化量的比值为电压支撑能力评价指标$\gamma(s)$，如式(7)所示。

$$\gamma(s)=\left|\frac{\Delta I_{\mathrm{cQ}}(s)}{\Delta U(s)}\right| \tag{7}$$

式中：s为复频域变量。

式(7)与文献[13]提出的有效无功电流增益指标在形式上是统一的。该指标代表了电压支撑设备支路的频域导纳特性。

进一步推广短路比的含义，在频域上定义全过程短路比指标$\Gamma(s)$为：

$$\Gamma(s)\triangleq\frac{\Delta I_{\mathrm{Q}}(s)}{\Delta U(s)}=\gamma_{\mathrm{SCR0}}+\gamma(s)=S_{\mathrm{B}}^{-1}[B+S_{\mathrm{B}}\gamma(s)] \tag{8}$$

式(8)的物理意义就是该节点在复频域上的无功电流-电压灵敏度，其能够计及装置的动态控制特性。由此可见，传统短路比指标是式(8)在某一模态频率点的特例，主要取决于计算短路容量时所采用的短路阻抗取值。在选择稳态短路阻抗时，$\Gamma(s\to0)$反映系统静态电压稳定；而在选择次暂态短路阻抗时，$\Gamma(s\to\infty)$反映在扰动瞬间次暂态工频电压的控制水平。

标准GB/T 40581—2021《电力系统安全稳定计算规范》[20]中对于短路比指标的要求为新能源并网点多场站短路比应不小于2.0，宜大于3.0。由于在国内常用电力系统机电暂态仿真软件短路比计算程序中，短路容量S_{ac}是基于同步发电机次暂态电抗X_d''计算的，因而所对应的短路比实质为母线次暂态频段无功电流-电压灵敏度。

对于新能源交流汇集送出系统，既需要限制暂态工频过电压，又需要提升静态电压稳定极限。这要求短路比指标能够反映场站接入点全频段电压支撑的强度。

1.3　全过程短路比推广到多馈入系统

上述全过程短路比指标是在单馈入系统中定义的，本质上反映该场站的无功电流-电压灵敏度；在多馈入系统中，文献[7]中的广义短路比就是基于多端口交流网络中无功电流-电压灵敏度矩阵而定义的指标。因此，从物理本质出发，可将全过程短路比指标推广到新能源多场站，从而计及多个新能源场站间的交互影响，具体思路如下。

考虑文献[7]中的多馈入系统模型，记n个新能源场站的容量比矩阵为$\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}=\mathrm{diag}(S_{\mathrm{B}i})$，其中，$S_{\mathrm{B}i}$为

第i个新能源场站的额定容量与系统基准容量之比。将新能源容量比矩阵加权至网络侧后，从n个新能源场站端口往交流电网看去的电压灵敏度方程为：

$$\Delta \boldsymbol{Q}(s)\approx \Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}(s)=\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{-1}\boldsymbol{Y}(s)\Delta \boldsymbol{U}(s) \tag{9}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{Q}(s)$为无功功率扰动量；$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}(s)$为无功电流扰动量；$\Delta \boldsymbol{U}(s)$为电压幅值扰动量；$\boldsymbol{Y}(s)$为等值网络的导纳矩阵，计及了各新能源场站电压支撑设备的动态特性，具体表达式如式(10)所示。

$$\boldsymbol{Y}(s)\approx \boldsymbol{B}+\mathrm{diag}\left[S_{\mathrm{B}i}\gamma_i(s)\right] \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{B}\in \mathbf{R}^{n\times n}$为交流电网的导纳矩阵[7]；$\gamma_i(s)$为以第$i$个新能源场站额定容量为基准时电压支撑能力评价指标，与式(7)一致。

因此，基于广义短路比推导思路，可推广得到适用于多场站系统的全过程广义短路比指标$\Gamma_{\mathrm{MR}}(s)$，具体表达式为式(11)或式(12)。

$$\Gamma_{\mathrm{MR}}(s)\triangleq \min\lambda\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{-1}\boldsymbol{Y}(s)\right]=\frac{1}{\max\lambda\left[\boldsymbol{Z}(s)\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}\right]} \tag{11}$$

$$\Gamma_{\mathrm{MR}}^{-1}(s)\triangleq\left\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\boldsymbol{Z}(s)\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\right\|_2=\max_{\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}(s)\neq 0}\frac{\left\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\Delta \boldsymbol{U}(s)\right\|_2}{\left\|\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{Q}}(s)\right\|_2}=$$

$$\max\sigma\left[\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\boldsymbol{Z}(s)\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}^{\frac{1}{2}}\right]=\max\lambda\left[\boldsymbol{Z}(s)\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}\right] \tag{12}$$

式中，$\lambda[\cdot]$和$\sigma[\cdot]$分别表示求矩阵的特征值和奇异值；$\|\cdot\|_2$表示求矩阵的二范数；$\boldsymbol{Z}(s)$为等值阻抗矩阵，即$\boldsymbol{Z}(s)=\boldsymbol{Y}^{-1}(s)$。全过程广义短路比指标反映了多馈入新能源场站电压幅值向量对无功电流向量的最大灵敏度，计及了调相机等电压支撑设备的全频段电压支撑能力。

进一步地，在实际系统的规划和运行中，也可以基于电压-无功灵敏度矩阵定义母线视角下的全过程短路比指标，用于分析系统强度。具体地，第i个场站并网母线的短路比指标$\Gamma_{\mathrm{MR}i}(s)$如式(13)所示，其理论基础详见文献[7]。

$$\Gamma_{\mathrm{MR}i}(s)=\frac{1}{r_i\{\mathrm{abs}\left[\boldsymbol{Z}(s)\right]\boldsymbol{S}_{\mathrm{B}}\}}=\frac{1/|Z_{ii}(s)|}{S_{\mathrm{B}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}|Z_{ij}(s)/Z_{ii}(s)|S_{\mathrm{B}j}}=\frac{|S_{\mathrm{aci}}(s)|}{S_{\mathrm{B}i}+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}|Z_{ij}(s)/Z_{ii}(s)|S_{\mathrm{B}j}} \tag{13}$$

式中：$r_i\{\cdot\}$表示求矩阵的第i行元素之和；abs[·]表示矩阵的各元素取模值；$Z_{ij}(s)$为等值阻抗矩阵$\boldsymbol{Z}(s)$的第i行、第j列元素；$S_{\mathrm{aci}}(s)$为第i个场站并网母线的短路容量。

与新能源多场站短路比指标[8]对比，式(13)将指标中的常数阻抗、短路容量都替换成计及动态特性的传递函数形式，以此体现电压支撑设备控制特性对于短路比指标的影响，揭示接入点在全频段的电压强度。在实际工程应用时，可以针对重点关注的频率点(例如，静态$s\to 0$和次暂态$s\to\infty$这2种特殊情况)，将式(13)转化为复数表达式进行计算，求得短路比指标的变化范围。同样的思路可以拓展到文献[7]中提及的另外几种节点广义短路比指标，以达到不同的计算精度。

2 调相机电压支撑能力评估

2.1 调相机励磁控制系统电压支撑能力指标

调相机采用定子磁链定向，d轴电压约等于零，q轴电压约为电压幅值[13]。在正常运行时，调相机功角为零，故d轴电流i_d代表无功电流，q轴电流i_q代表有功电流。如果忽略定子电阻，仅考虑无功电压方向的响应特性，则系统小信号传递函数框图如附录A图A2所示。图中：V_{ref}为机端电压参考值；u_q为机端电压；E_{fd}为励磁电压；T'_{d0}、T''_{d0}分别为d轴暂态开路时间常数、次暂态开路时间常数；$F(s)$为励磁系统传递函数；$X_d(s)$为运算电抗。

在不考虑励磁控制时，电机自身运算电抗$X_d(s)$的具体表达式见式(14)，其揭示了在不同时间尺度下调相机电抗的变化过程[21]。具体而言，从次暂态到暂态并最终到稳态的过程中，电抗从X''_d变化到X'_d并最终到X_d。

$$X_d(s)=\frac{X_d-X'_d}{(sT'_{d0}+1)(sT''_{d0}+1)}+\frac{X'_d-X''_d}{sT''_{d0}+1}+X''_d \tag{14}$$

考虑励磁控制后，电压支撑能力指标$\gamma_{\mathrm{SC}}(s)$如式(15)所示，具体推导过程见附录B。

$$\gamma_{\mathrm{SC}}(s)=\left|-\frac{\Delta i_d(s)}{\Delta u_q(s)}\right|=\left|\frac{F(s)/[(sT'_{d0}+1)(sT''_{d0}+1)]+1}{X_d(s)}\right| \tag{15}$$

由式(14)和式(15)可绘制如图3所示的调相机频域特性曲线，其中，具体参数见附录B表B1。

图3中紫色曲线为不考虑励磁控制时调相机自身特性曲线，该曲线根据运算电抗X_d的倒数绘制。从低频到高频，幅频曲线对应值逐渐升高，最终到次

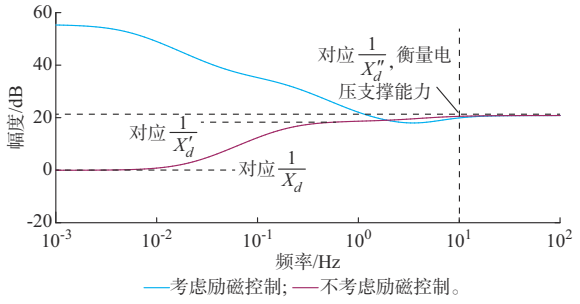

图3　考虑和不考虑励磁控制的调相机频域特性曲线
Fig. 3　Frequency-domain characterisitic curves of synchronous condenser with and without consideration of excitation control

暂态电抗的倒数$1/X''_d$。具体来说，在小于0.05 Hz频段内，曲线值近似对应同步电抗X_d的倒数；在0.1～5 Hz频段内，曲线值对应暂态电抗X'_d的倒数；在大于10 Hz频段内，曲线值对应次暂态电抗X''_d的倒数。

图3中蓝色曲线为考虑励磁控制后调相机的频域特性曲线，在频率大于10 Hz时，幅频曲线对应值基本恒定，该值正是次暂态电抗的倒数$1/X''_d$，表明在高于次暂态的频段，励磁控制作用基本可以忽略。在暂态和稳态对应的低频段，尽管电机运算电抗X_d显著增大，但由于励磁控制以维持机端电压恒定为目标，显著提升了低频段的幅频曲线对应值，从而具备更强的电压支撑能力。具体而言，调相机在扰动瞬间和稳态时的电压支撑指标值如下：

$$\begin{cases}\gamma_{SC}(s\to\infty)=\dfrac{1}{X''_d}\\ \gamma_{SC}(s\to 0)=\dfrac{K_1K_2K_A+1}{X_d}\approx\infty\end{cases}\tag{16}$$

式(16)中，对$s\to 0$的稳态，由于励磁控制系统中控制器比例系数K_1、K_2和可控硅放大倍数K_A之积较大，$\gamma_{SC}(s\to 0)$接近无穷。因此，采用传统恒电压控制方式的调相机在稳态时的电压支撑能力要远大于在次暂态时的电压支撑能力。

2.2　考虑无功外环级联的调相机电压支撑能力分析

分布式调相机应用于新能源场站，通过接收AVC指令参与稳态电压控制。如果AVC以无功指令下发给调相机励磁控制器，则需要在励磁定电压控制的外环级联一个无功控制环节$Q_Q(s)$，对应传递函数为：

$$G_Q(s)=k_{Qp}+\frac{k_{Qi}}{s}\tag{17}$$

式中：k_{Qp}、k_{Qi}分别为比例系数、积分系数。

考虑级联无功控制的系统小信号传递函数框图如附录A图A3所示。图中：Q_{ref}为调相机无功功率参考值。由此，可推导调相机的电压支撑能力指标为：

$$\gamma_{SC}(s)=\left|-\frac{\Delta i_d(s)}{\Delta u_q(s)}\right|=\left|\frac{F(s)/[(sT'_{d0}+1)(sT''_{d0}+1)]+1}{X_d(s)+U_{t0}G_Q(s)F(s)/[(sT'_{d0}+1)(sT''_{d0}+1)]}\right|\tag{18}$$

式中：U_{t0}为调相机端口电压的稳态值。

采用定电压励磁控制和级联无功外环级联控制的调相机的频域特性曲线如图4所示，相应参数见附录B表B1。由图4可以看出，无功外环并不影响次暂态频段的特性，然而，0.1 Hz以下低频段幅频响应指标明显降低，且远小于次暂态电抗倒数$1/X''_d$对应的数值。具体而言，考虑无功外环后，调相机在扰动瞬间和稳态时电压支撑指标值如下：

$$\begin{cases}\gamma_{SC}(s\to\infty)=\dfrac{1}{X''_d}\\ \gamma_{SC}(s\to 0)\approx 0\end{cases}\tag{19}$$

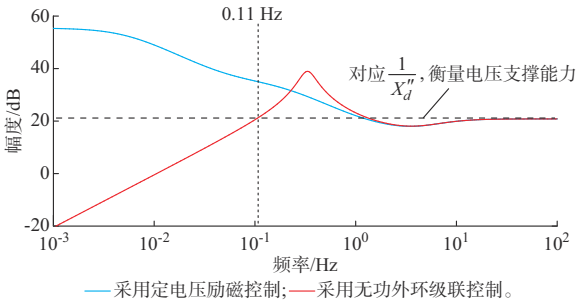

图4　2种控制方式下的调相机频域特性曲线
Fig. 4　Frequency-domain characterisitic curves of synchronous condenser in two control modes

图5给出了2种控制方式下，系统经历故障全过程中调相机母线电压和无功响应的波形。故障为220 kV双回线中的一回线路发生三相短路，线路保护200 ms动作切除故障线路，系统由双回线变为单回线运行。2种控制方式下，在故障发生和故障恢复初期，由于励磁控制系统来不及起作用，二者曲线几乎重合。电机受到自身物理方程约束，其维持次暂态电势E''_q不变，等效内阻抗为次暂态电抗X''_d。随着故障恢复过程的继续，定电压控制方式下，调相机机端电压逐渐恢复至电压参考值V_{ref}，等效内电抗逐渐变化为$X_d/(K_1K_2K_A+1)$，调相机稳态无功出力大于故障前。在此方式下，采用次暂态电抗的倒数$1/X''_d$衡量其电压支撑能力，在工程实践中具有一定的保守性。然而，采用无功外环级联控制后，调相

机输出无功功率逐渐恢复为故障前参考值，无功支撑不足导致机端电压降低，调相机由电压恢复瞬间的电压源特性逐渐转变为稳态的电流源特性。此时，如果仍然采用次暂态电抗的倒数$1/X''_d$衡量其电压支撑能力，结果过于冒进。如果多个新能源场站配置的调相机均以定无功方式接入，则按照此高估的短路比指标制定运行极限，将导致系统面临静态/动态电压失稳的风险。因此，为了维持场站全过程电压支撑能力，分布式调相机与AVC的协调控制需要谨慎设计。

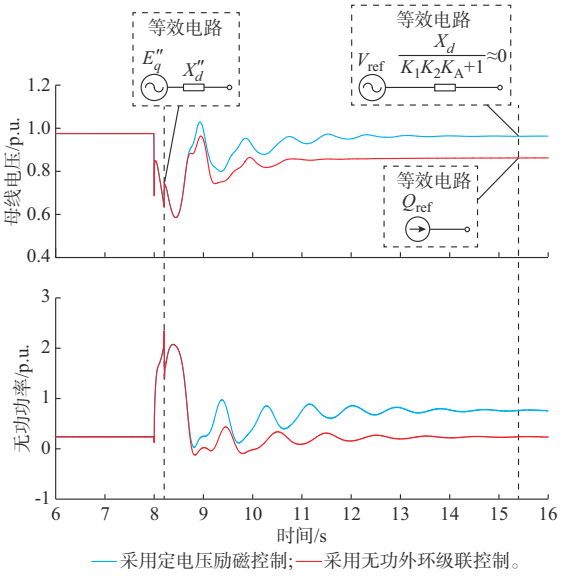

图5　系统故障场景下调相机母线电压和无功响应波形
Fig. 5　Waveforms of bus voltage and reactive power response of synchronous condenser in system fault scenario

3　场站全过程短路比指标

为了推导图2所示场站并网点全过程短路比指标，建立等效电路如附录A图A4所示。尽管场站内部拥有多个电源设备，但由于现有新能源机组通常为跟网型设备，具有可控电流源特性[22]，其等效导纳近似为零，故忽略其电压支撑能力。

注意到第2章推导得到的电压支撑能力指标$\gamma_{SC}(s)$表现为调相机端口特性，且以调相机额定容量S_{SC}为基准。进一步地，以场站额定容量为基准，计及二级升压变压器的漏抗，可计算新能源场站并网点的全过程短路比指标：

$$\Gamma(s)=\frac{1}{S_B}\left\{\frac{1}{X_g}+\frac{1}{S_{sys}}\frac{1}{1/[\gamma_{SC}(s)S_{SC}]+X_{T1}/S_{T1}+X_{T2}/S_{T2}}\right\}=\gamma_{SCR0}+\gamma_{WF}(s) \tag{20}$$

式中：S_{sys}为系统基准容量，取值为100 MV·A；X_g为以系统容量S_{sys}为基准的电网等效电抗标幺值；S_{T1}为35 kV/220 kV变压器额定容量，X_{T1}为该变压器漏抗标幺值；S_{T2}为10.5 kV/35 kV变压器额定容量，X_{T2}为该变压器漏抗标幺值。

上述短路比指标由两部分组成：一部分由电网等效电抗决定，即配置调相机前的初始短路比γ_{SCR0}，是一个定值；另一部分由新能源场站决定，为调相机支路接入后对并网点短路比的贡献$\gamma_{WF}(s)$，该值与调相机动态控制特性相关。

绘制2种控制方式下$\gamma_{WF}(s)$的频域特性曲线，如图6所示。

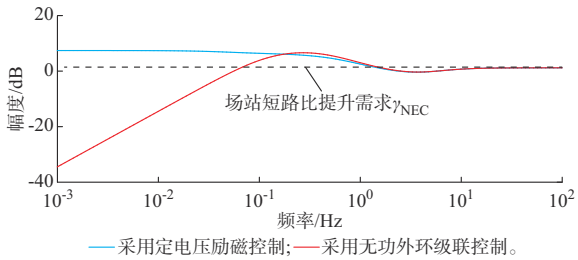

图6　2种控制方式下$\gamma_{WF}(s)$的频域特性曲线
Fig. 6　Frequency-domain characterisitic curves of $\gamma_{WF}(s)$ in two control modes

由于设备容量变比和变压器漏抗的影响，与图4展示的调相机自身频域特性相比，图6中整体幅频曲线都向下移动。图6中虚线代表了当用$1/X''_d$衡量调相机的电压支撑能力时，调相机支路接入后对并网点短路比的贡献值，表达式如(21)所示：

$$\gamma_{NEC}=\gamma_{WF}(s)\Big|_{\gamma_{SC}(s)=1/X''_d}=\frac{1}{S_B}\frac{1}{S_{sys}}\frac{1}{X''_d/S_{SC}+X_{T1}/S_{T1}+X_{T2}/S_{T2}} \tag{21}$$

γ_{NEC}也代表了新能源场站短路比提升需求，可以看到，只有调相机采用以机端电压为控制目标的励磁控制时，才能让新能源场站并网点在全频段内都达到短路比要求。如果调相机采用了无功外环级联控制，尽管其不会影响调相机对于瞬时工频过电压问题的抑制作用，但对于故障恢复后的动态调节过程有负面影响，在低频段存在不能满足短路比指标要求的风险，会限制系统功率送出极限。

4　仿真验证

按照图2所示系统结构，绘制调相机采用不同控制方式时的PV曲线图，评估输送能力提升效果，并通过硬件在环仿真对比不同控制策略对于系统电压支撑作用的差异。

4.1　*PV* 曲线图

图7给出了调相机采用定电压励磁控制时的稳态、采用无功外环级联控制时的稳态、调相机次暂态过程3种情况下对应的*PV*曲线。在次暂态期间，调相机是电压源，等效电抗为次暂态电抗X''_d。稳态时，如果调相机采用励磁控制，则等效电路也是电压源，且等效电抗接近于零，*PV*曲线更加平缓，对应的送出极限更大。然而，如果调相机采用无功外环级联控制，则等效电路为电流源，故*PV*曲线下降速率增大，送出极限减小。结果表明，级联无功外环不利于提升输电极限。

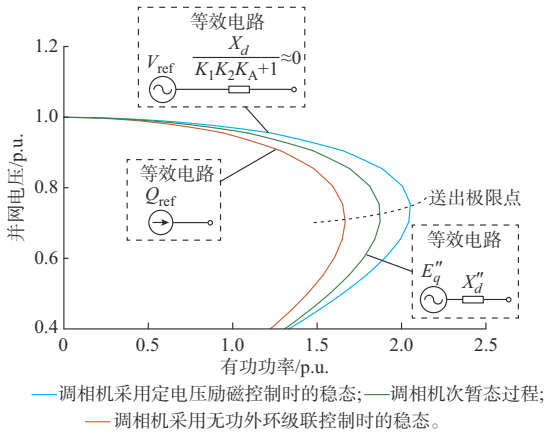

图7　不同控制方式的*PV*曲线

Fig. 7　*PV* curves with various control strategies

4.2　基于RTDS的硬件在环仿真平台验证

按照图2所示结构，基于RTDS搭建硬件在环仿真平台，其中，调相机控制器为实际控制器。在$t=7$ s时，220 kV送出线路中一回线路发生三相永久短路故障，故障后0.2 s切除此回线路，风电场220 kV输电线变为单回线运行。

调相机不接入、调相机接入且采用定电压励磁控制、调相机接入且采用无功外环级联控制这3种方式下的仿真结果如图8所示。由图可见，在故障发生之前，由于系统强度较大，3种方式都能稳定运行。然而，故障后由于切除了一回线路，系统强度变弱，3种方式特性不同。为了便于对比，故障前3种方式下无功功率输出均为零。当调相机不接入时，故障后220 kV母线电压降低，触发风机低电压穿越判据，风机反复进入低电压穿越控制，风电场输出有功功率和端口电压反复波动。当调相机接入且仅采用定电压励磁控制时，故障后调相机自动增发无功功率以维持机端电压恒定，进而支撑风电场端口电压，系统稳定运行。当调相机采用无功外环级联方式时，由于外环控制响应速度较慢，在故障期间调相机的响应波形与不加无功外环时基本一样，且在故障后也能够维持一段时间的电压稳定。但是，由于无功外环的缓慢作用，调相机无功功率向故障前的无功指令进行调节，输出逐渐减小，导致电压逐渐降低，最终仍触发了风机低电压穿越判据，风机反复进入低电压穿越控制，风电场端口电压与输出功率反复波动。仿真结果说明，调相机级联无功外环会弱化其电压支撑能力，与配置调相机的初衷不符。设备的电压支撑能力受到自身控制环节的影响，在电压支撑能力评估和提升方案中，需要考虑这方面的影响以使得新能源场站具备全过程电压支撑能力。

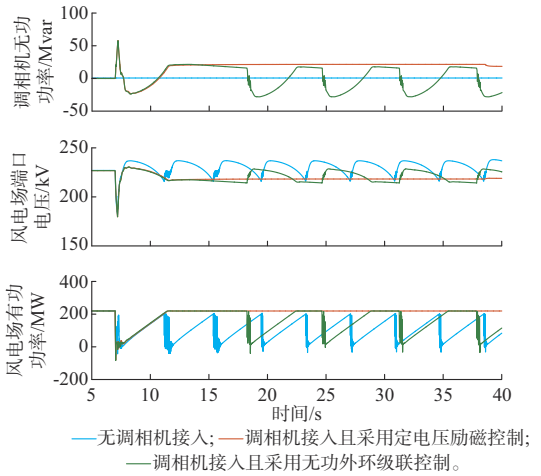

图8　3种方式下新能源场站波形对比

Fig. 8　Comparison of waveforms for renewable energy stations in three modes

5　结语

本文从系统需求角度指出新能源场站需要具备全过程电压支撑能力，并在频域上定义全过程短路比指标来衡量控制特性对于电压稳定性的影响。该指标的物理意义为电压灵敏度，能够有效表征设备及新能源场站的多时间尺度电压支撑能力，且给出了推广到多馈入系统的思路，能够计及多新能源场站之间的交互影响。

针对新能源场站配置调相机的典型场景，本文推导了调相机在不同控制策略下的电压支撑能力指标和新能源场站并网点全过程短路比指标，说明了调相机采用定电压控制时，用其次暂态电抗衡量电压支撑能力、计算短路比指标时具有保守性，工程上可行。然而，当调相机级联无功控制外环时，其在低频段不再呈现电压源特性，此时采用次暂态电抗计算短路比指标时的结果过于冒进，会为系统引入潜在风险。最后，基于RTDS的硬件在环仿真结果验证了本文分析的有效性。

后续工作将围绕分布式调相机接入AVC参与

场站无功电压协调配合控制策略、参数整定和现场试验验证等方面开展研究。本文研究工作对于其他构网型设备的全频段电压支撑能力评估、短路比指标计算及运行极限制定等方面也具有指导意义。

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] 张玮,白恺,鲁宗相,等.特大型新能源基地面临挑战及未来形态演化分析[J].全球能源互联网,2023,6(1):10-25.
ZHANG Wei, BAI Kai, LU Zongxiang, et al. Analysis of the challenges and future morphological evolution of super large-scale renewable energy base [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 10-25.

[2] 刘昕宇,史兴华,辛焕海,等.故障恢复期间新能源多场站系统过电压快速评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(13):168-175.
LIU Xinyu, SHI Xinghua, XIN Huanhai, et al. Fast assessment method for overvoltage in multiple renewable energy station system during fault recovery process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 168-175.

[3] XIN H H, LIU X Y, ZHENG D, et al. Risk assessment of post-fault temporary overvoltage using generalized short-circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1837-1849.

[4] 习工伟,赵兵,郑帅飞,等.新能源基地经特高压交流送出系统输电能力与提升措施[J].电力建设,2022,43(7):131-138.
XI Gongwei, ZHAO Bing, ZHENG Shuaifei, et al. Transmission capacity and improvement measures of the UHVAC sending system from new energy base [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 131-138.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 周瑀涵,辛焕海,鞠平.基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法:回顾、探讨与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(10):3794-3811.
ZHOU Yuhan, XIN Huanhai, JU Ping. System strength quantification principle and method of multi-infeed systems based on generalized short-circuit ratio: reviews, discussions and outlooks[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3794-3811.

[8] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.新能源多场站短路比定义及指标[J].中国电机工程学报,2021,41(2):497-506.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.

[9] 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.

[10] 杨浩,刘虎,丁肇豪,等.计及短路比提升与暂态过电压抑制的含高比例风电送端电网两阶段式调相机优化配置[J].电网技术,2024,48(2):540-552.
YANG Hao, LIU Hu, DING Zhaohao, et al. Two-stage optimal configuration of condenser for high-proportion wind power sending-end power grid considering short circuit ratio increase and transient overvoltage suppression [J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 540-552.

[11] 李锴,邵德军,徐友平,等.基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J].电网技术,2019,43(8):2961-2967.
LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2961-2967.

[12] 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.

[13] 李志强,种芝艺,黄金军.快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6877-6885.
LI Zhiqiang, CHONG Zhiyi, HUANG Jinjun. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6877-6885.

[14] 李志强,肖洋,李程昊,等.励磁系统对调相机动态无功特性的影响[J].电网与清洁能源,2023,39(7):1-8.
LI Zhiqiang, XIAO Yang, LI Chenghao, et al. Influence of excitation system on the dynamic reactive power characteristics of condensers[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(7): 1-8.

[15] ZHAO Tianqi, XIE Huan, XIA Xue, et al. Analysis on transient overvoltage mechanism of large-scale renewable energy integration system[C]// 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI^2), October 30-November 1, 2020, Wuhan, China.

[16] LUND T, WU H, SOLTANI H, et al. Operating wind power plants under weak grid conditions considering voltage stability constraints [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15482-15492.

[17] 徐式蕴,孙华东,王姝彦,等.高比例电力电子电力系统过电压(二):交流对称故障下暂时工频过电压机理[J].中国电机工程

学报，2024，44(5)：1701-1712.
XU Shiyun, SUN Huadong, WANG Shuyan, et al. Overvoltage of the power system integrated with high proportion of power electronics equipment (Ⅱ): mechanistic analysis of transient power frequency overvoltage caused by AC symmetrical fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1701-1712.
[18] 吴林林，赵伟，徐曼，等.考虑风电机组故障穿越特性的电压反复波动机理分析与抑制[J].全球能源互联网，2022，5(3)：290-297.
WU Linlin, ZHAO Wei, XU Man, et al. Mechanism analysis and suppression of repeated voltage fluctuation considering fault ride through characteristics of the wind turbine[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 290-297.
[19] 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.
[20] 电力系统安全稳定计算规范：GB/T 40581—2021[S].北京：中国标准出版社，2021.
Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
[21] KUNDER P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
[22] 杜程茂，杜雄，苏婧媛，等.定子电流控制的双馈风机导纳建模与次同步振荡风险分析[J].电力系统自动化，2023，47(13)：159-167.
DU Chengmao, DU Xiong, SU Jingyuan, et al. Admittance modeling and subsynchronous oscillation risk analysis of DFIG-based wind turbine with stator current control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 159-167.

梁倍华(1991—)，男，博士，工程师，主要研究方向：电力电子化电力系统建模及稳定性分析。E-mail：LiangbhEli@163.com

谢　欢(1979—)，男，通信作者，博士，教授级高级工程师，主要研究方向：电力系统稳定及源网协调技术。E-mail：xiaosan_616@aliyun.com

赵天骐(1990—)，男，博士，高级工程师，主要研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：zhao.tianqi@jibei.sgcc.com.cn

（编辑　蔡静雯）

Construction Scheme of Voltage-supporting Renewable Energy Station Based on Distributed Synchronous Condensers—Part One　Mechanism Analysis

LIANG Beihua[1], *XIE Huan*[1], *ZHAO Tianqi*[1], *LIANG Hao*[1], *HAO Jing*[1], *XIN Huanhai*[2]

(1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute (Flexible Resource-Network-Demand-Storage Co-operation and Control Laboratory), Beijing 100045, China;
2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The integration of distributed synchronous condensers into renewable energy stations can effectively improve the short-circuit ratio index and the system transmission capability. However, the influence and quantitative evaluation of the control characteristics of synchronous condensers on the voltage-supporting capability and the power grid strength are rarely studied. First, this paper explains the requirements of the voltage-supporting function of the station throughout the entire process. Based on the frequency-domain index, the difference in voltage-supporting capability of synchronous condensers with two strategies of voltage control and cascaded reactive power outer loop control is compared and analyzed. It is revealed that the introduction of the reactive power outer loop will cause the characteristic of the synchronous condenser at the low frequency to transform into that of the current source, reducing the voltage-supporting capability of the system during the dynamic regulation process after fault clearance. Next, a short-circuit ratio index for the entire process of a renewable energy station with synchronous condensers is proposed, whose physical meaning is voltage sensitivity. This index can effectively describe the influence of different control strategies on voltage stability at multiple time scales, which explains the adaptability of using subtransient reactance parameters of the synchronous condenser to calculate operation limits. Finally, the correctness of the analysis conclusions is verified through RTDS hardware-in-the-loop simulation.

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

Key words: renewable energy station; synchronous condenser; voltage supporting; voltage stability; short-circuit ratio; multi-timescale; operation limit