



含构网型储能与分布式调相机的新能源场站多元惯量主动支撑方案研究

刘静佳, 赵璐璐, 褚景春, 朱海涛, 金翼, 孙振新
(国家能源集团新能源技术研究院有限公司, 北京 102200)

摘要: 本文分析了构网型储能与分布式调相机的工作原理及优劣特性, 调研了二者典型技术特性差异情况, 将构网型储能的有功功率支撑强、全生命周期经济性优异但运行安全裕度有限与分布式调相机的无功功率过载能力强、安全性高但长期运维经济性欠佳特性结合, 提出面向新能源场站的强惯量支撑、高安全可靠、高经济性的多元复合主动支撑技术方案。并依托RTLAB半实物仿真平台, 接入行业头部设备厂商真实物理控制器, 搭建含构网型储能、分布式调相机、光伏场站的弱电网新能源场站仿真系统, 完成弱电网下构网型储能与分布式调相机暂态特性对比分析, 并开展多种主动支撑配置方案对新能源场站并网发电能力提升对比仿真。仿真结果表明, 构网型储能可呈现与分布式调相机相近的暂态电压/频率支撑性能, 所提构网型储能+分布式调相机的多元复合主动支撑方案可充分发挥两种惯量支撑设备的技术优势, 弥补单一技术方案的不足, 降低新能源场站投资成本, 同步提高系统综合扰动抑制能力及场站全生命周期经济效益。

关键词: 新能源场站; 构网型储能; 分布式调相机; 复合主动支撑

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0422

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-16

Research on Multi-inertia Active Support Scheme of New Energy Power Station With Grid-Forming Energy Storage and Distributed Synchronous Condensers

LIU Jingjia, ZHAO Lulu, CHU Jingchun, ZHU Haitao, JIN Yi, SUN Zhenxin
(CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: This paper analyzed the operating principles, performance merits and demerits of grid-forming energy storage and distributed synchronous condensers, and investigated the differences in their typical technical characteristics. By integrating the technical and economic features of grid-forming energy storage, which featured strong active power support, excellent full-life-cycle economic efficiency yet limited operational safety margin, with those of distributed synchronous condensers, which strong reactive power overload capacity, high operational safety but unsatisfactory economic performance in long-term operation and maintenance, and proposed a multi-integrated active support scheme with high inertia support

收稿日期: 2026-05-15; 修改稿日期: 2026-07-08。

基金项目: 国家能源集团科技项目 (GJNY-24-115)。

第一作者: 刘静佳 (1988—), 女, 硕士, 中级, 研究方向为构网型储能技术, E-mail: 20089328@ceic.com; 通信作者: 赵璐璐, 高级职称, 研究方向为储能规划配置研究, E-mail: 20019029@ceic.com。

引用本文: 刘静佳, 赵璐璐, 褚景春, 等. 含构网型储能与分布式调相机的新能源场站多元惯量主动支撑方案研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-16.

Citation: LIU Jingjia, ZHAO Lulu, CHU Jingchun, et al. Research on Multi-inertia Active Support Scheme of New Energy Power Station With Grid-Forming Energy Storage and Distributed Synchronous Condensers[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-16.

capabcity, superior safety reliability and economic efficiency is proposed for renewable energy power plants. On the RTLAB hardware-in-the-loop simulation platform, actual physical controllers supplied by leading mainstream manufacturers are incorporated to establish a weak-grid simulation model of renewable energy power plants, which integrates grid-forming energy storage, distributed synchronous condensers and photovoltaic stations. Comparative analysis on the transient performance of the two devices under weak grid conditions was completed. Moreover, comparative simulations were performed to evaluate the improvement in grid-connected power generation capability of renewable energy power plants under different active support configuration strategies. Simulation results demonstrated that grid-forming energy storage delivered transient voltage and frequency support performance similar to distributed synchronous condensers. The proposed hybrid active support scheme combining grid-forming energy storage and distributed synchronous condensers can fully exploit the technical advantages of the two inertia support devices and compensate the deficiencies of individual schemes. Meanwhile, it can reduces the investment cost of renewable energy power plants, and simultaneously enhances the comprehensive disturbance suppression capability as well as the full-life-cycle economic benefits of the power stations

Keywords: New Energy Station; Grid-forming energy storage; Distributed synchronous condenser; Multi-composite active support

1 引言

随着全球能源结构向低碳化转型加速推进,我国新能源装机规模实现跨越式增长,电源结构迎来根本性变革。截至2025年底,全国新能源装机容量已突破16亿千瓦,成为我国第一大电源,其中,西北、华北等地区已建成多个千万千瓦级新能源基地,新能源发电量占比持续提升。然而新能源为低惯量、间歇式能源,其并网占比逐步提升,叠加我国新能源“大规模集中开发、远距离高电压外送”的典型运行方式,导致电网出现“低抗扰性、低惯量、低短路容量”的典型特征,系统惯量、频率、电压等稳定问题突出,高比例新能源地区电网在受扰后极易发生宽频振荡、次/超同步谐振、连锁脱网和电压崩溃等失稳事故^[1-8],严重制约新能源并网发电与跨区送出能力,受电力系统安全稳定约束,目前,青海、新疆等地区已面临新能源并网和送出受限困境。

近年来,国内外已多次发生因新能源场站故障穿越能力弱、控制策略适配性不足或弱电网下变流器失稳引发的大面积停电事故,如英国“8·9”大停电、西班牙、葡萄牙大停电事件以及我国西北部

区多起新能源连锁脱网事件,充分印证了提升新能源基地主动支撑能力的紧迫性与必要性^[1-2]。在此背景下,具有真实物理惯量的分布式调相机与可提供虚拟惯量的构网型储能成为破解新型电力系统破解安全稳定难题的主流技术方案^[9-11],也迅速成为当前研究和工程实践的热点方向。其中,分布式调相机因技术成熟,已在青豫直流送端、新能源基地等多个电网关键节点实现规模化工程落地,构网型储能作为新兴技术方案也快速发展,已在国内多个新能源基地完成示范投运,应用前景广阔^[12-14]。

分布式调相机本质为无原动机的同步发电机,具有真实物理惯量及较强的无功支撑能力且技术成熟,已广泛获得电网企业的认可,但其缺乏有功功率调节能力、运行能耗偏高,对提升新能源弃电消纳水平无正向支撑价值;构网型储能通过虚拟同步机/下垂控制等模拟同步机转子特性,使变流器呈现“电压源+虚拟阻抗”特性,可主动建立电压并提供虚拟惯量,此外配置储能电池提供能量吞吐能力,可有效提升新能源消纳量获得电能量市场收益,因此在新能源侧场景中得到广泛关注,但其高度依赖电力电子器件和复杂控制算法,存在过载能力弱、工程成熟度低、现场验证尚不充分等问题。

从运行机理来看，分布式调相机和构网型储能均为“电压源”设备，现阶段，受限于测试设备、测试环境等因素，尚无针对二者特性的全面实证对比，因此，在弱电网新能源场站中，惯量支撑设备的选型缺乏完善的理论与实践支撑。针对该痛点问题，本文依托半实物仿真平台，搭建弱电网新能源场景，接入行业头部设备厂商真实物理控制器，开展分布式调相机与构网型储能的暂态特性对比仿真、量化二者对新能源支撑能力差异，并提出多元惯量复合主动支撑方案，融合分布式调相机强无功支撑、高技术成熟度的优势与构网型储能的强有功支撑、高投资回报率的优势，可同时满足新能源消纳与电网安全稳定运行的双重需求。

2 主动支撑设备工作原理介绍及特性分析

目前行业内主流主动支撑设备包括物理惯量设备及虚拟惯量设备两类，其中物理惯量设备的典型代表为分布式调相机，虚拟惯量设备的典型代表为构网型储能。

2.1 分布式调相机

分布式调相机系统组成部分主要包括调相机本体、励磁系统、启动系统、升压变压器、冷却系统、保护系统和油系统^[15-16]，如图1所示。

其中，调相机本体为能量转换核心，作为同步旋转电机，运行中转子通入励磁电流建立空间磁

场，定子与电网耦合，吸收/发出无功功率，实现电网电压动态调节，可有效优化电网功率因数、维持并稳定节点电压水平；励磁系统为转子提供可调直流励磁电流，控制无功输出大小与方向。

分布式调相机的电压方程为^[15]：

$$\dot{U}_t = \dot{E}_f - jI_d X_d \quad (1)$$

式中： $\dot{U}_t$ 为分布式调相机的定子端电压； X_d 为调相机的直轴同步电抗； I_d 电枢电流； $\dot{E}_f$ 为励磁电动势，励磁电动势可由励磁系统调节励磁电流 I_f 改变。

由式（1）可知，分布式调相机可以通过改变励磁电流 I_f 的大小来改变其发出无功功率的大小和性质，调相机运行方式分为正常励磁、过励磁和欠励磁三种运行工况：

正常运行：励磁电动势与分布式调相机端电压相等（即 $\dot{E}_f = \dot{U}_t$ ）时， $I_d = 0$ ，调相机输入系统的无功功率为零。

欠励磁运行（进相状态）：励磁电动势小于分布式调相机端电压（即 $\dot{E}_f < \dot{U}_t$ ）时， I_d 超前机端电压 90° ，调相机进相运行，发出容性无功（或吸收感性无功）。

过励磁运行（迟相状态）：励磁电动势大于分布式调相机端电压相等（即 $\dot{E}_f > \dot{U}_t$ ）时， I_d 滞后机端电压 90° ，调相机迟相运行，发出感性无功（或吸收容性无功）。

由此可知，通过调节调相机励磁系统对励磁电流大小进行控制，可实现调相机的不同无功功率的输出或吸收，实现对电力系统中无功功率的灵活补偿。

分布式调相机内电势暂态电压方程为：

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{fd} - E_q' - (X_d - X_d') I_d \quad (2)$$

T_{d0}' 为d轴暂态开路时间参数； E_q' 为q轴暂态电动势； E_{fd} 为励磁电动势的d轴分量； X_d 为d轴同步电抗； X_d' 为d轴暂态电抗； I_d 为d轴电流。

电网发生故障后，调相机可在次暂态、暂态和稳态时间阶段提供无功补偿，以维持电力系统的稳定运行：

次暂态阶段：当电网发生瞬时故障导致调相机机端电压突变时，调相机可在几到几十毫秒内快速响应并发出大量无功功率，减小故障后电压变化的

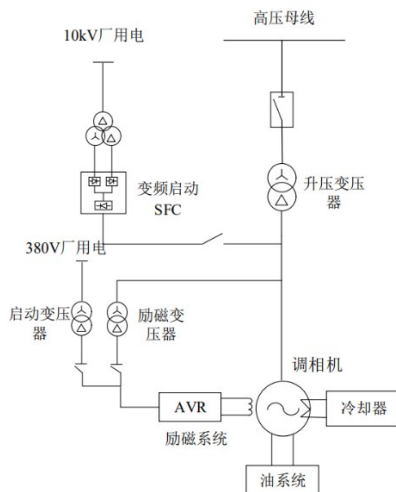


图1 分布式调相机系统组成结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of distributed synchronous condenser system composition

幅度和速度；

暂态阶段：调相机通过励磁系统短时（毫秒级）发出额定容量两倍以上无功功率，在系统发生严重故障时，励磁系统持续强励提供无功电压支撑，加快系统电压恢复；

稳态阶段：当故障长时间未清除时，调相机通过励磁系统持续深度迟相或进相运行，持续调节系统无功使系统故障后达到新稳定运行状态。

调相机作为旋转设备，其转子运动方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P/J & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -T_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： P 为分布式调相机的极对数； J 为转子的转动惯量； T_e 为电磁转矩； θ 为电角度， ω 为电角速度。由于稳态时角度 θ 是以同步转速为角频率的一个变量，为便于稳态分析，引入同步旋转的 xy 轴系，并定义角度 δ 为转子 q 轴超前于 x 轴的角度，用角度 δ 来替代转子运动方程中的角度 θ ，两个角度满足关系式：

$$\delta = \theta - \omega_s \quad (4)$$

式中： ω_s 为同步转速。

将上式代入（3），得到标么值下分布式调相机的转子运动方程为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \delta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1/(2H) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_e \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： H 为机组惯性时间常数。

当电网电压下降时，分布式调相机可以增加无功功率输出；当电网电压上升时，调相机则可吸收无功功率。启动后作为真实的电压源提供惯量支撑能力，具备惯量支撑能力、电压稳定支撑能力、谐波抑制能力，可在高比例新能源场集中地区、末端弱电网、直流换流站等存在电压、频率稳定问题的场景中起到快速调压、增加惯量和短路容量等作用^[17]。

2.2 构网型储能系统

目前行业内构网型控制策略（GFM, Grid Forming）以虚拟同步机控制技术为主，其通过模拟同步发电机的机械摇摆方程，实现对电力系统频率或电压的支撑，具备惯量支撑及阻尼功能，在解决目前新能源场站安全稳定问题方面具有显著优势^[18-19]。

构网型储能控制系统包括有功-频率控制回路、无功-电压控制回路，以及实现控制所必需的电压

电流双闭环控制、空间矢量调制（SVPWM, Space Vector Pulse Width Modulation）等部分构成^[20-21]，构网型控制整体结构如图1所示，本文仅介绍虚拟同步机控制技术及自动电压调节（AVR, Automatic Voltage Regulator）控制方案，双闭环控制、SVPWM部分与传统储能系统相同，本文不再赘述。

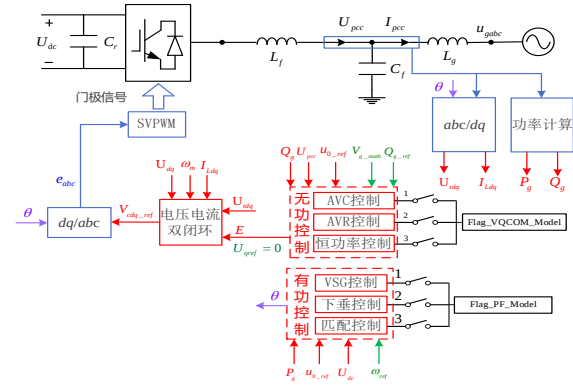


图2 构网型储能控制框图

Fig.2 Control block diagram of grid-Forming energy storage

其中有功-频率控制回路，包括虚拟惯量控制和虚拟调速控制两部分，虚拟惯量控制模拟传统同步机转子运动方程，如下式所示：

$$\begin{cases} \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_g}{\omega_n} - D(\omega - \omega_{ref}) = J \frac{d\omega}{dt} \\ \theta = \int \omega dt \end{cases} \quad (6)$$

式中： ω_n 为额定角频率； ω 为实际角频率； ω_{ref} 为设定角频率； J 为转动惯量（ $J=2H$ ）； D 为阻尼常数； P_g 和 P_m 分别为构网型储能系统实际输出功率和设定功率； θ 为相位角。

虚拟调速控制模拟同步机调速器，其计算公式如下：

$$P_m = P_{ref} + K_d(\omega_{ref} - \omega) \quad (7)$$

一次调频通过实际频率 ω 与参考角频率 ω_{ref} 得到频率偏差 $\Delta\omega$ ，频率变化导致电网频率偏离标准值时，发电机的调速器会自动调整发电功率以恢复频率。虚拟同步机控制通过模拟这一过程，实现对电网频率的控制，当检测到电网频率偏差时，虚拟同步机控制器调整输出功率以进行惯量支撑。

其中，无功-电压控制回路采用AVR控制，模拟同步发电机励磁控制系统的机端电压自动调节控制，提高发电机组运行的稳定性，其数学表达式

如下：

$$E = U_0 + K_q(Q_{ref} - Q_g) + K_v(U_{ref} - U_{pcc}) \quad (8)$$

式中： E 为参考电压幅值； U_0 为电网电压参考值； Q_g 为输出无功功率； K_q 为无功下垂系数； Q_{ref} 为无功功率参考值； U_{pcc} 为公共耦合点相电压幅值； K_v 为电压下垂系数； U_{ref} 为电压参考值。

根据 U_{pcc} 点电压偏差与无功功率偏差与电网电压参考值共同形成变流器端电压参考值 E 。此外，为保证设备的安全运行，常采用虚拟阻抗方案限制故障期间电流，防止故障期间电流超出变流器过载能力。

构网型储能在传统跟网型储能的基础上，采用虚拟同步机等构网型控制策略，模拟同步发电机的行为和性能，可等效为“电压源”提供虚拟惯性和阻尼，具备电压稳定重构能力、频率稳定重构能力、宽频振荡抑制能力、黑启动能力等功能^[21]。

3 基于半实物仿真的物理惯量与虚拟惯量设备主动支撑特性对比

为厘清构网型储能与分布式调相机的技术特性差异，揭示二者对新能源场站并网运行特性的影响，本文基于RT-LAB半实物仿真平台开展仿真对比试验，首先依据现行国标，搭建标准化的分布式调相机、光伏系统仿真模型，并根据青海海南州某新能源场站构网型储能系统一次设备参数，建立构网型储能系统单机模型；为真实复现实际设备的控制响应特性，仿真系统接入设备厂商配套真实物理控制器，保证控制逻辑、响应特性与工程实际一致，并在同一电网边界与运行工况，开展构网型储能与分布式调相机的动态特性仿真对比，仿真场景如图3所示。

其中，50Mvar分布式调相机模型根据青海海南州某新能源场站分布式调相机实际设备参数搭建；构网型储能系统单机为200kW，利用单机倍乘方式实现50MW场站级系统建模；光伏系统单机功率为200kW，通过倍乘方式可等效为任意场站容量，本文仿真中取200MW；基于等值弱电网模型，可以设置全工况电网故障。

为全面对比二者的技术特性，本章分别从二者在等值弱电网下典型暂态特性、对新能源支撑能力、全生命周期经济性三个方面展开对比研究。

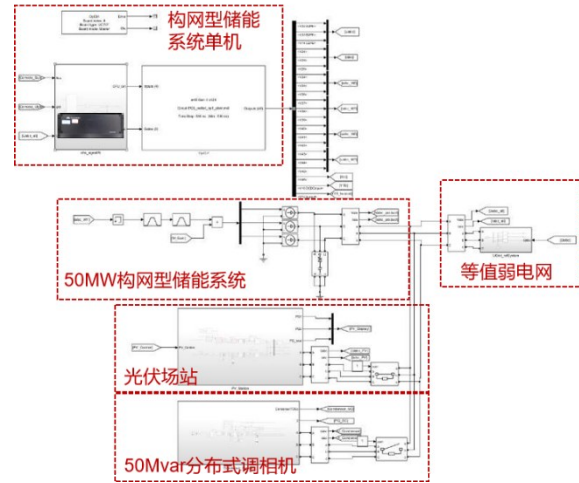


图3 新能源+构网型储能+分布式调相机仿真系统
Fig.3 Simulation system with new energy、grid-Forming energy storage、distributed synchronous condenser

3.1 构网型储能与分布式调相机典型特性仿真对比

本文在 $SCR=1.5$ 的弱电网场景下，分别接入50MW构网型储能系统与等值弱电网+50Mvar分布式调相机系统，开展低电压穿越、高电压穿越、连续低高穿越、频率波动、低频振荡抑制、相位跳变等典型电网故障工况暂态测试。

仿真测试前，等值电网的电压、频率均处于额定值，构网型储能系统有功功率指令 P_{ref} 置0、电压控制指令 V_{ref} 置为1pu，分布式调相机励磁系统电压参考值 V_{ref} 置为1pu。

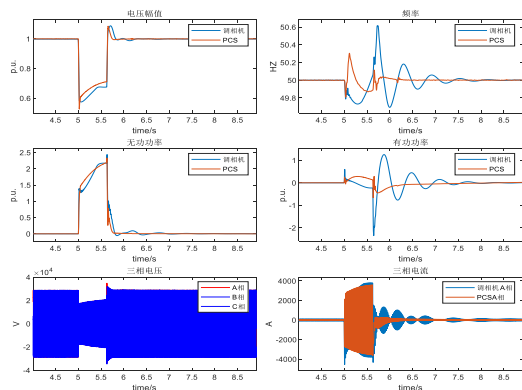
3.1.1 低电压穿越

构网型储能与分布式调相机的三相跌落至20%、单相跌落至20%仿真对比波形如下图所示。

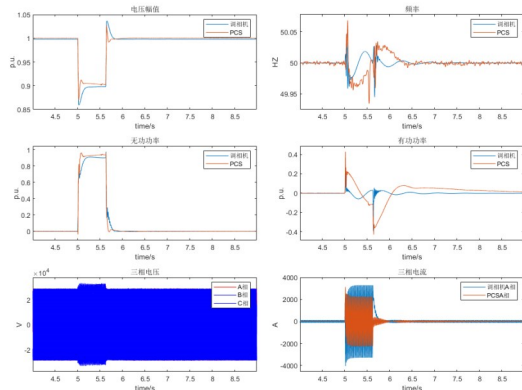
如图4所示，在35 kV电压跌落瞬间，构网型储能与分布式调相机均快速反应，调节无功功率输出平抑交流电压波动、调节有功功率输出平抑交流频率波动；与分布式调相机相比，三相低穿跌落时构网型储能可更好的抬升并网点电压幅值、缩短电压波动时间、降低频率波动；单相低穿跌落时，构网型储能可更好的抬升并网点电压幅值、缩短电压波动时间，然而增大了频率波动幅度、延缓了频率恢复速度（具体量化指标见附录1）。

3.1.2 高电压穿越

构网型储能与分布式调相机的三相升高至130%、单相升高至130%仿真对比波形下图



(a) 三相故障



(b) 单相故障

图 4 电压跌落至 20% 工况的对比波形

Fig.4 Comparative waveforms under voltage sag to 20%:(a) Three-phase fault, (b) Single-phase fault

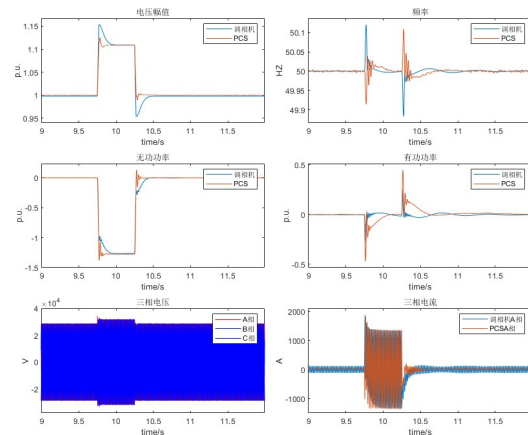
所示。

如图 5 所示,在 35kV 电压升高瞬间,构网型储能与分布式调相机均快速反应,调节无功功率输出平抑交流电压波动、调节有功功率输出平抑交流频率波动;在故障发生和故障恢复瞬间,与分布式调相机相比,高穿过程中构网型储能可更好的稳定并网点电压幅值、缩短电压波动时间,然而增大了频率波动幅度、延缓了频率恢复速度(具体量化指标见附录 1)。

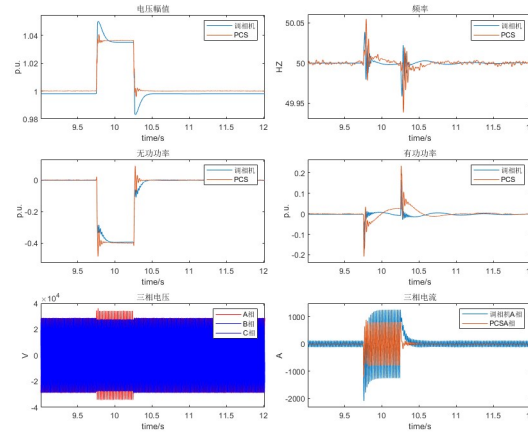
3.1.3 连续故障穿越

构网型储能与分布式调相机的 20%-130%、20%-20% 连续故障仿真对比波形下图所示。

如图 6 所示,在 35kV 电压连续故障期间,构网型储能与分布式调相机均快速反应,调节无功功



(a) 三相故障



(b) 单相故障

图 5 高电压穿越工况下对比波形

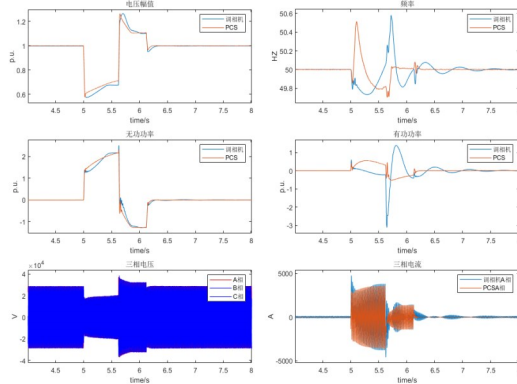
Fig.5 Comparison waveforms under high voltage ride-through:(a) Three-phase fault, (b) Single-phase fault

率输出平抑交流电压波动、调节有功功率输出平抑交流频率波动;在故障发生和故障恢复瞬间,与分布式调相机相比,连续故障期间构网型储能可更好的稳定并网点电压幅值、缩短电压波动时间、降低频率波动、加快频率恢复速度(具体量化指标见附录 1)。

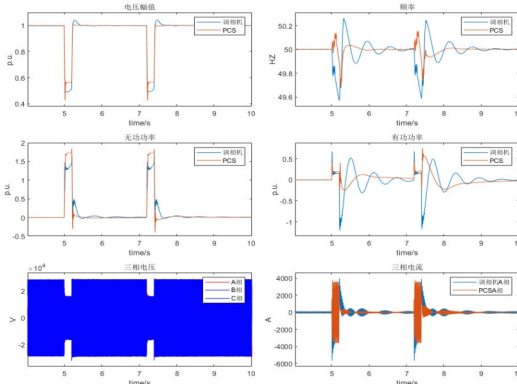
3.1.4 频率波动下的惯量响应

设置构网型储能系统惯量系数 $T_j=5.33s$ (与分布式调相机一致),频率波动下的惯量响应波形如下图所示。

如图 7 所示,在 35kV 电压源频率改变期间,构网型储能与分布式调相机均快速反应,调节有功



(a) 20%-130%-100%



(b) 20%-20%

图6 连续故障穿越工况下对比波形

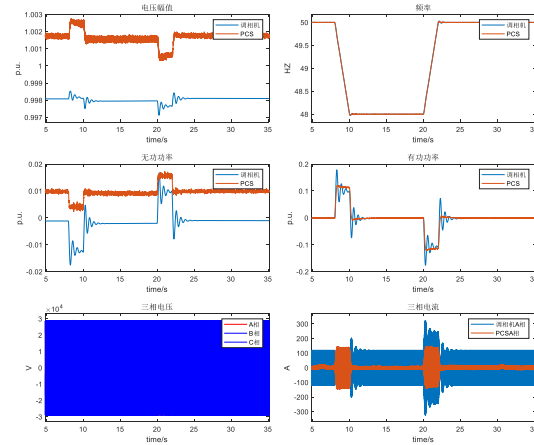
Fig.6 Comparison waveforms under continuous fault ride-through:(a) Three-phase fault, (b) Single-phase fault

功率输出平抑交流频率波动,受系统有功无功耦合交互影响,电压幅值出现较小波动、两种支撑设备均可自主调节无功出力抑制电压波动;在频率降低和升高瞬间,二者有功功率出力趋势相似,但分布式调相机受同步电机暂态功角摇摆、电磁暂态突变、励磁/阻尼控制动态响应等影响出现功率工频波动,构网型储能功率输出平滑无波动、系统恢复稳定速度更快(具体量化指标见附录1)。

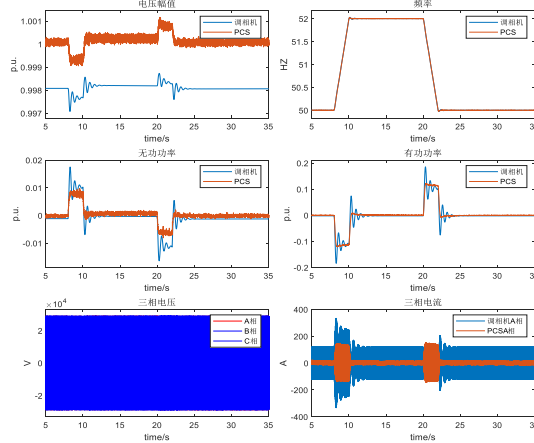
3.1.5 不同惯量时间常数下电网频率变化

分布式调相机受物理设备影响,惯量时间常数恒定;而构网型储能系统为虚拟惯量,其惯量时间常数可在3~20s间设置。下面给出构网型储能系统不同惯量时间常数的仿真波形图。

如图8所示,在35kV电压源频率改变期间,



(a) 50-48Hz



(b) 50-52Hz

图7 频率波动下对比波形

Fig.7 Comparison waveforms under frequency fluctuation:(a) 50-48Hz, (b) 50-52Hz

构网型储能可根据预设的惯量时间常数,调节有功功率输出,为系统注入不同的有功功率值,应对不同电网应用需求,惯量时间常数灵活性优于分布式调相机。

3.1.6 低频振荡抑制

系统稳定运行中,在5s处设置35kV电压源输出频率按照 $50+A\sin(2\pi Bt)$ 进行扰动,其中 $A=0.1\text{Hz}$, $B=1\text{Hz}$,构网型储能系统/分布式调相机并网点电压幅值、频率、系统无功功率、系统有功功率、交流三相电压、交流三相电流的波形如下图所示。

如图9所示,在35kV电压源出现低频振荡期

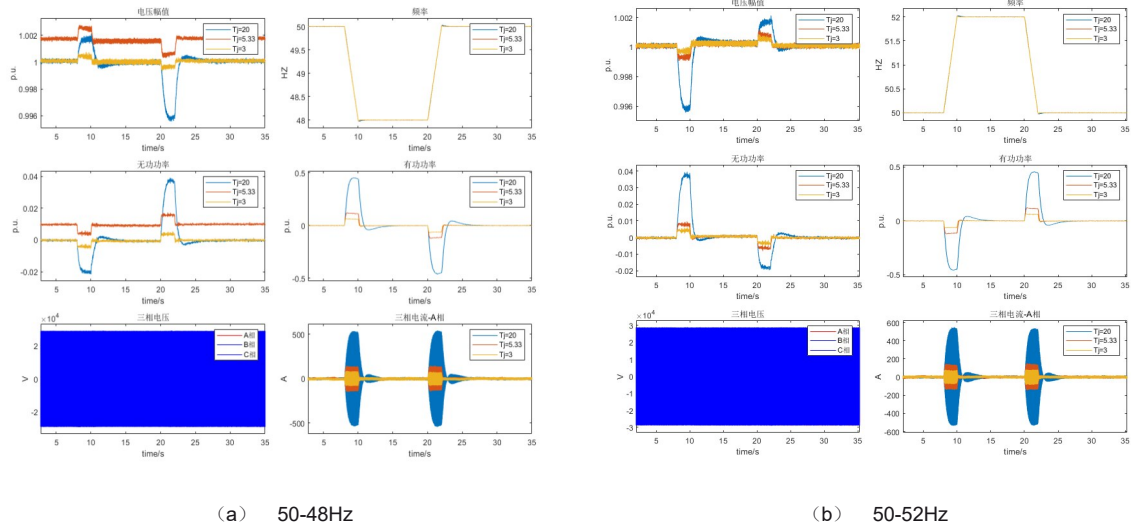
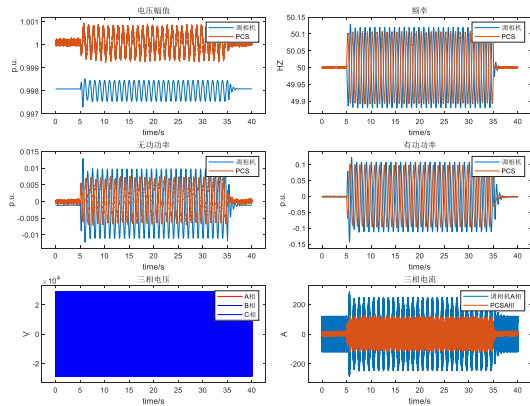
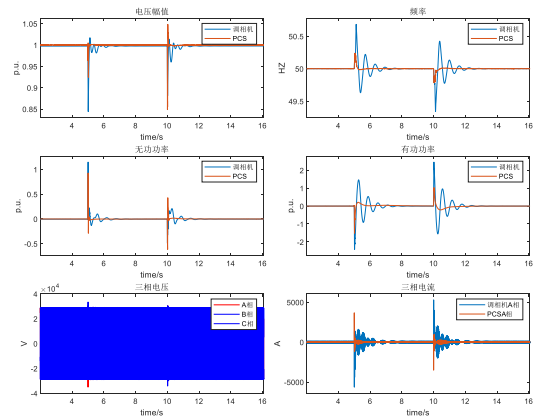


图 8 构网型储能不同惯量时间常数下响应波形

Fig.8 Response waveforms of grid-forming energy storage under different inertia time constants: (a) 50-48Hz, (b) 50-52Hz

图 9 低频振荡抑制 (0.1Hz、1Hz) 下对比波形
Fig.9 Comparison waveforms under low-frequency oscillation suppression (0.1 Hz and 1 Hz)图 10 60°相角跳变下对比波形
Fig.10 Comparison waveforms under 60°-phase angle jump

间, 构网型储能与分布式调相机均快速反应, 调节无功功率输出平抑交流电压波动、调节有功功率输出平抑交流频率波动; 二者出力趋势相似, 与分布式调相机相比, 构网型储能可加快系统恢复稳定的速度 (具体量化指标见附录 1)。

3.1.7 相角跳变

构网型储能与分布式调相机在电网 60°跳变时的故障仿真对比波形下图所示。

如图 10 所示, 在 35kV 电压源相角跳变期间, 构网型储能与分布式调相机均快速反应, 调节无功功率输出平抑交流电压波动、调节有功功率输出平

抑交流频率波动; 二者出力趋势相似, 与分布式调相机相比, 构网型储能可更好的稳定并网点电压幅值、缩短电压波动时间、降低频率波动、加快频率恢复速度 (具体量化指标见附录 1)。

3.2 构网型储能与分布式调相机对新能源支撑能力对比

为全面对比构网型储能与分布式调相机对新能源场站并网量的影响, 本报告分别在以下三种工况下对比主动支撑设备对新能源场站并网量及并网点电压、频率的影响。

3.2.1 无主动支撑设备的新能源运行仿真

将光伏场站接入 $SCR=1.5$ 的弱电网中，电网电压、频率均设置为额定值；光伏单机功率设置为 $1pu$ （即 $200kW$ ），仿真测试启动后，将单机倍乘系数按照 $20/s$ 的速率爬升，模拟 $200MW$ 光伏场站并网场景。

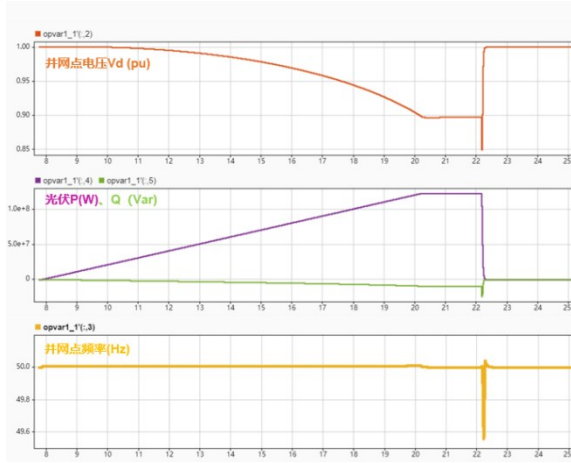


图 11 光伏场站接入弱电网仿真波形

Fig.11 Simulation waveforms of photovoltaic station connected to weak grid

由图 11 可知，随着光伏单机并网数量增加，光伏场站有功功率逐步增大，因光伏场站内部阻抗影响，场站并网点电压幅值逐步下降；当光伏场站有功功率增加至 $122MW$ 时，并网点电压幅值低于 $0.9pu$ ，此时暂停光伏场站并网数量，但并网点电压幅值仍处于 $0.9pu$ 以下，根据《GB/T19664-2024 光伏发电站接入电力系统技术规定》中关于低电压穿越的技术要求，光伏系统在并网点电压幅值小于 $0.9pu$ 且持续 $2s$ 后脱网。因此，在 $22.3s$ 时，光伏逆变器因电压幅值持续 $2s$ 小于 $0.9pu$ 而脱网。

在该弱电网场景下，无主动支撑设备时，光伏场站最大并网容量仅为 $122MW$ 。

3.2.2 新能源+构网型储能运行仿真

将光伏场站接入 $SCR=1.5$ 的弱电网中并配置 $50MW$ 构网型储能系统，电网电压、频率均设置为额定值。光伏单机功率设置为 $1pu$ （即 $200kW$ ），仿真测试启动后，将单机倍乘系数按照 $20/s$ 的速率爬升，模拟 $200MW$ 光伏场站并网场景。

随着光伏场站有功功率逐步增大，场站并网点电压幅值逐步下降；当电压幅值降至 $0.9pu$ 时，为

防止光伏逆变器脱网，手动暂停光伏场站并网容量，并手动投入构网型储能系统，构网型储能无功出力增大，抬升并网点电压幅值至 $0.98pu$ 后，增加光伏场站倍乘系数 N ；随着光伏场站并网容量增加，场站并网点电压幅值再次下降，构网型储能系统可主动根据电压幅值调节无功出力。

最终，构网型储能系统通过调整无功出力，调节并网点电压幅值，使 1000 台（ $200MW$ ）光伏单机全部并网成功，最终并网点电压幅值稳定在 $0.91pu$ ，光伏逆变器可稳定并网运行。

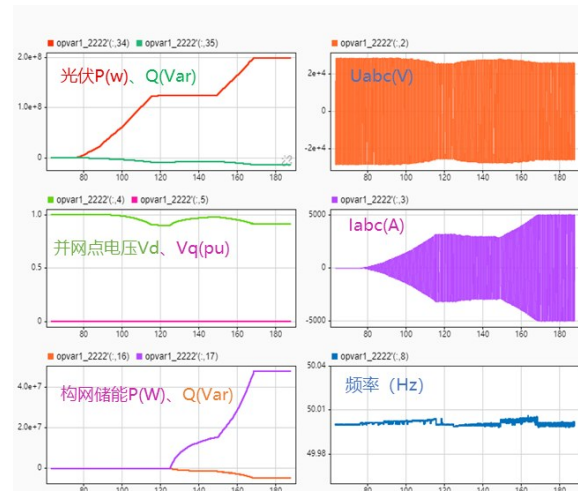


图 12 构网型储能系统辅助光伏场站接入弱电网仿真波形
Fig.12 Waveforms of Photovoltaic Station Integrated into Weak Grid with Grid-Forming Energy Storage

3.2.3 新能源+分布式调相机运行仿真

将光伏场站接入 $SCR=1.5$ 的弱电网中并配置 $50Mvar$ 分布式调相机系统，电网电压、频率均设置为额定值。仿真测试启动后，首先将分布式调相机启动，并设置电压参考值 V_{ref} 为 1 ，然后设置光伏单机功率为 $1pu$ （即 $200kW$ ），随后将单机倍乘系数按照 $20/s$ 的速率爬升，模拟 $200MW$ 光伏场站并网场景。

随着光伏单机并网数量增加，场站并网点电压幅值逐步下降；分布式调相机自动调节其无功出力，以抬升并网点电压幅值。最终，在分布式调相机无功功率输出的支撑下， 1000 台（ $200MW$ ）光伏场站全部并网成功时并网点电压幅值始终大于 $0.9pu$ ，保证了光伏场站的稳定并网运行。

综上可知，相同容量下，构网型储能在电网电压、频率波动、振荡抑制、相角跳变等工况下，具

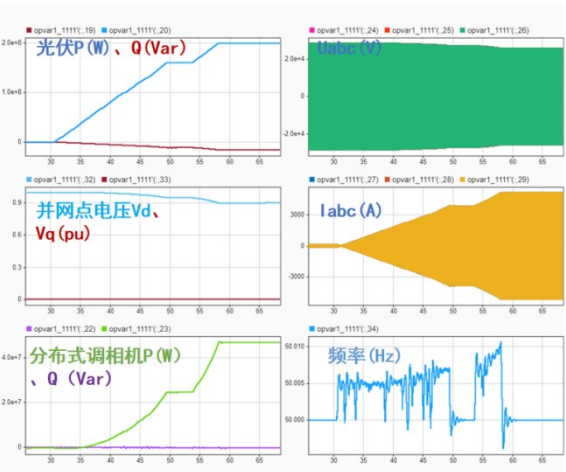


图 13 分布式调相机辅助光伏场站接入弱电网仿真波形
Fig.13 Waveforms of Photovoltaic Station Integrated into Weak Grid with Distributed Synchronous Condenser

有与分布式调相机相媲美的响应特性，甚至在部分场景下构网型储能对并网点的支撑作用更优，且二者具有对新能源场站相似的支撑作用，均可作为弱电网下新能源场站的惯量支撑设备。

3.3 构网型储能系统与分布式调相机全生命周期经济性对比

目前应用于新能源场站的分布式调相机以 10kV、50MVar 为主，使用寿命约 20 年，因此本文

以 50MW/Mvar 容量、20 年使用周期为准核算构网型储能与分布式调相机的经济成本。

工程应用中，设备全生命周期成本包括初始投资成本、运维成本两项。初始投资成本包括设备购置费（含辅助系统）、土建及安装调试费等，根据 2026 年前 5 个月市场招投标及行业主流设备厂家调研情况，按照设计采购施工总承包模式，单台 10kV、50Mvar 分布式调相机的初始投资成本约 0.45 亿元（单价约 0.9 元/var）；50MW/100MWh 组串式构网型储能系统的初始投资成本约 0.5 亿元（单价 0.5 元/Wh）。

日常运维费用是运维成本的基础，主要包括能耗成本、人工成本、日常巡检费用、备品备件消耗费用及运维工具费用等，本文依据分布式调相机及储能系统运维标准，结合行业内设备运维情况调研，分别核算了 20 年生命周期内分布式调相机与构网型储能的运维成本，如表 1 和表 2 所示，并考虑到构网型储能系统锂电池使用寿命约 10 年，运维成本中计及 1 次直流侧电池更换成本。

综上，全生命周期内 1 台 10kV/50MVar 分布式调相机总成本约 1.3056 亿元；50MW/100MWh 构网型储能系统总成本约 1.17 亿元；鉴于构网型储能具备较大的能量吞吐能力，构网型储能可额外赚取

表 1 单台分布式调相机全生命周期运维成本

类别	费用计算	备注
运维人员成本	2 人×24 万元/人/年=48 万元/年	包含工资、食宿、社保等开支，平均一个调相机站需要 2 人运维
日常巡检成本	8 万元/年	包括巡检设备、巡检工具维护
备品备件消耗成本	12 万元/年/台	碳刷等易损件更换
调相机检修成本（大修）	200 万/台÷6 年/次=33 万元/年/台	5-8 年 1 次，每台 200 万/次
调相机检修成本（小修）	75 万/台/年×5 次÷6 年=62.5/年/台	每年 1 次，75 万/台，大修当年无需进行小修
能耗成本	2%×50MVar×24h×365 天×0.3 元/kWh=262.8 万元/台	考虑新能源上网电价约 0.3 元/kWh；电耗约 2%。
合计	426.3 万元/年	电费：0.05256 元/Var/年 其他：0.031 元/Var/年
全生命周期运维成本	8526 万元	同站两台时，运维人员成本按照单台核算。

表 2 50MW 构网型储能场站全生命周期运维成本

类别	费用核算	备注
运维人员成本	2 人×24 万元/人/年=48 万元/年	包含工资、食宿、社保等开支，平均一个储能站按照 2 个运维人员配置
专项巡检成本	0.33 万元/月×12=3.96 万元/年	包括巡检设备、巡检工具使用、专业人员费用
定期维护成本	0.65 万元/季度×4=2.6 万元/年	易损件更换
异常处理成本	0.2 万元/次×2=0.4 万元/年	每年 2 次，每次平均 0.2 万元
故障处理成本	4 万元/年	每年 1 次，每次平均 4 万元
待机能耗成本	300kW×8760h×0.3 元/kWh= 78.8 万元/年	考虑新能源上网电价约 0.3 元/kWh；设备功耗以 3kW/MWh 为准
直流侧电池更换成本	0.4 亿元	满 10 年后电池全部更换
全生命周期运维成本	0.67 亿元（常规储能系统）	人员及待机能耗按照 20 年核算，其他运维成本按照 17 年核算

容量补贴费用、电能量市场收益，因此可见，在20年生命周期内构网型储能系统较分布式调相机具有较明显的经济优势。

4 新能源场站多元惯量复合主动支撑方案

4.1 构网型储能与分布式调相机协同控制机理分析

构网型储能通过虚拟同步控制对外呈现电压源特性，可主动建立电压、频率；分布式调相机作为旋转电气设备，提供物理惯量、强短路电流支撑与动态无关，二者在响应时间尺度、能量形态、支撑物理量上高度互补，但其协同并非简单叠加，而是存在明确的机理耦合。

短路比支撑协同机理：GFM的稳定性高度依赖于并网点短路比，在极弱电网中，其同步环路与电网阻抗耦合产生负阻尼，易诱发振荡。分布式调相机并入后，其次暂态电抗 X_d'' 与系统并联，可提升并网点等效短路容量 S_{sc}' ：

$$S_{sc}' = S_{sc} + \frac{U_N^2}{X_d''} \quad (9)$$

因此，分步式调相机的接入也提升了并网点等效短路比

$$SCR' = \frac{S_{sc}'}{P_{GFM}} \quad (10)$$

短路比的提升直接增大了GFM控制环的相位裕度与阻尼，使其等效输出阻抗 Z_{GFM} 与电网阻抗 Z_g 在振荡频段更容易满足广义Nyquist稳定判据。可见，本质上调相机以物理强度改善电网阻抗特性，为构网型储能提供稳定的运行边界，使其虚拟电压源控制不因弱电网而失稳。

频率-惯量响应方面，GFM采用虚拟同步控制，其有功-频率控制环模拟转子运动方程：

$$2H_{GFM} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_g - D_{GFM}(\omega - \omega_0) \quad (11)$$

分布式调相机则遵循真实摇摆方程(无原动机输入， $P_m=0$)：

$$2H_{sc} \frac{d\omega}{dt} = -P_g - D_{sc}(\omega - \omega_0) \quad (12)$$

二者并联系统遭受功率扰动 ΔP 时，频率初始变化率RoCoF由二者惯量并联决定：

$$RoCoF = \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P \cdot \omega_n}{2(H_{GFM} + H_{sc})S_N} \quad (13)$$

二者惯量系数H不同，在扰动初期(0~几十

ms)，分布式调相机瞬时无延时释放物理动能，抑制RoCoF，提供“无延时但短时的物理惯量”；扰动数十ms后，构网储能经测量/控制环节输出虚拟惯量，并持续输出调频功率，提供“略有延时但可持续的虚拟惯量与调频能量接力”，二者惯量响应在时间轴上级联互补。

从扰动发生到系统恢复的整个过程中，两类装备在时间轴上可依次占优、无缝接力，其物理根源在于能量释放原理不同：次暂态段(0~20ms，即工频半周内)：分布式调相机依靠转子物理动能与定子绕组磁链，在无控制延时下瞬时贡献次暂态电流，以真实惯量直接限制RoCoF。此阶段构网储能受测量与控制环节(载波、采样、滤波)约束，支撑电流较小。暂态段(20~300 ms)：构网储能虚拟同步控制环路完成响应，按公式(5~7)输出有功/无功，精准调节电压频率；调相机励磁系统尚在建立，其支撑由次暂态向暂态衰减。稳态段(>300 ms)：调相机仅能短时释放动能、转速回落后退出，构网储能凭借真实电池能量持续提供稳态有功功率。

将各时刻的归一化支撑贡献度叠加，即得下图的“双峰错时”互补曲线。

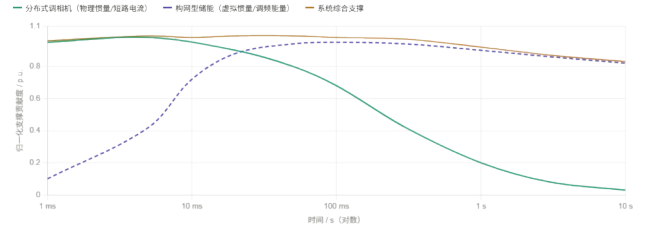


图 14 分布式调相机与构网型储能有功协同支撑曲线
Fig.14 Active Power Coordinated Support Curves of Distributed Synchronous Condensers and GFM

无功-电压响应方面，GFM的无功-电压环路方程如式(8)所示、分布式调相机的暂态内电势方程如式(3)所示。二者混合系统中，电压跌落初期(0~数十ms)，分布式调相机不受电力电子限幅约束，可在提供数倍次暂态电流，输出无功功率；扰动数十ms后，构网储能经测量/控制环节输出无功电流，分布式调相机与构网型储能均根据电压幅值调节输出无功功率，支撑电压。

从整个扰动过程看，两类设备均可提供强无功功率支撑，呈现近似的无功支撑能力，二者混合系统中可优化调整其下垂系数，达到预期目标。下图

为归一化无功支撑曲线示例, 在 $0.985 - 1.015\text{pu}$ 死区内, 储能不动作, 由调相机提供精细无功调节; 偏差增大时, 储能无功出力可快速达到满功率, 与调相机叠加使综合曲线在全电压区间维持近饱满支撑; 额定电压处三者均过零, 无多余无功环流。

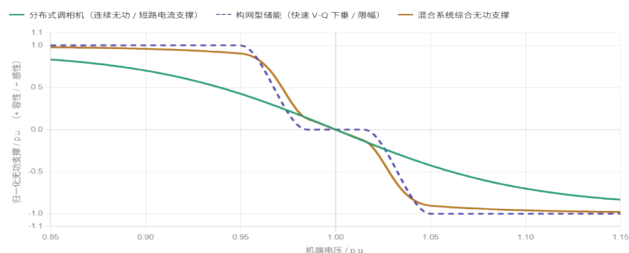


图 15 分布式调相机与构网型储能无功协同支撑曲线
Fig.15 Reactive Power Coordinated Support Curves of Distributed Synchronous Condensers and GFM

4.2 多元惯量复合主动支撑方案优势分析

鉴于上述特性对比, 有必要全面对比构网型储能与分布式调相机的各项技术特性, 针对应用场景选择最优的技术方案。

构网型储能作为优质灵活性调节资源, 具有电源与负荷的双重属性, 属于虚拟惯量设备, 其虚拟惯量时间常数可在 $3 \sim 20\text{s}$ 间灵活调整; 响应速度快, 可实现 10ms 级有功功率及无功功率调节; 具备孤岛运行及黑启动能力; 具有高效的能量吞吐能力。但构网型储能为电力电子设备, 故障期间最大短路电流受设备过载能力约束, 上限低; 长期大功率、高频次充放电会缩短电池寿命, 导致设备容量折损; 大规模应用时, 多机组协同同步控制难度较大^[22-24]。

分布式调相机属于特殊同步旋转电机, 技术方案成熟, 可提供真实物理惯量, 无设备过载限制, 主动支撑可靠性高; 无电池起火、爆炸等安全风险, 运行安全度更高; 无功支撑能力突出, 故障期间的最大短路电流水平可达 3.5 倍以上; 单机容量可达 50MVar 、 300Mvar , 规模化场站部署所需并列机组数量更少, 且依靠同步机固有特性实现与电网自同步, 稳定性好。但分布式调相机无电量存储能力, 且转子持续旋转会额外产生能量损耗; 无黑启动及孤岛运行能力; 惯量时间常数随转子本体固有参数确定, 不具备可调裕度; 有功功率调节上限较低, 针对长时间的频率波动持续支撑能力弱^[1]。

综合对比可知, 构网型储能与分布式调相机技

术特性存在互补性, 可将构网型储能的强有功功率支撑、宽惯量时间常数、大吞吐容量与分布式调相机的强无功功率支撑、高过载能力、高安全特性融合互补, 形成含构网型储能与分布式调相机的多元惯量联合主动支撑方案。以构网型储能通过控制策略提供虚拟惯量、以分布式调相机通过同步电机提供物理旋转惯量, 二者联合形成多元惯量配置方案。

该多元惯量联合主动支撑方案的核心优势表现为:

1. 电压与频率动态支撑互补, 全方位助力电网安全稳定。分布式调相机强大的无功电流过载能力, 可弥补构网型储能设备故障过载受限的短板, 满足新能源场站大量无功支撑需求, 有限改善电网电压暂态稳定特性; 电网频率波动时, 分布式调相机转子机械能自主释放, 实现故障瞬间秒级内有功功率支撑, 而构网型储能提供小时级有功支撑能力, 可弥补分布式调相机惯量支撑固定、支撑时长有限的缺陷。二者相互协作, 可实现有功功率/无功功率支撑能力的大幅提升, 对电网频率/电压波动的抑制能力显著增强, 将全面保障电网安全稳定, 提升新能源场站并网消纳量。

2. 惯量支撑与电量存储互补, 拓宽应用场景, 延长设备运行周期。构网型储能与分布式调相机复合支撑系统, 可兼具惯量支撑能力与电量存储能力, 并依托分布式调相机分担系统瞬时功率扰动, 降低构网型储能的高频次大功率充放电应用频次, 从而延缓电池容量衰减, 延长设备使用寿命; 构网型储能系统的电能双向调节能力可参与调频、调峰、现货市场等, 获取更高的投资收益, 且配套黑启动功能, 满足极端应用场景的系统恢复支撑需求。

由此可见, 含构网型储能与分布式调相机的多元惯量联合主动支撑方案, 可将构网型储能与分布式调相机的技术特性进行特性重构, 进行复合主动支撑, 实现强惯量支撑与高效能量吞吐的双重复合性能优势, 在电网安全运行与新能源场站投资运营层面均具备可观的技术价值与工程应用潜力。

4.3 多元惯量复合主动支撑方案仿真验证

为验证多元复合主动支撑方案的可靠性及可行性, 本文在弱电网新能源场站中同时配置 50MW 构网型储能设备+ 50Mvar 分布式调相机设备验证其稳

定运行能力，及其对新能源场站并网量及并网点电压、频率的影响。

仿真中将光伏场站接入SCR=1.5的弱电网中，并配置50Mvar分布式调相机，电压、频率均设置为额定值。测试启动后，首先将分布式调相机启动，并设置电压参考值Vref为1，然后设置光伏单机功率设置为1pu（即200kW），并按照20/s的斜率增加光伏场站倍乘系数N至1000，模拟200MW光伏场站并网场景。

仿真启动后，随着光伏单机并网数量增加，因光伏场站内部阻抗影响，场站并网点电压幅值逐步下降，分布式调相机自动调节其无功出力，以抬升并网点电压幅值，直至光伏出力达到200MW，调

相机无功出力达到50Mvar，并网点电压仍略小于0.9pu；增加构网型储能系统，构网型储能无功出力抬升，调相机出力回调，最终达到稳定值；随后继续增加光伏并网容量，并网点电压幅值再次下跌，分布式调相机和构网型储能同时增加无功输出以抬升并网点电压幅值，直至光伏并网容量达到249MW时，分布式调相机、构网型储能无功出力均达到50Mvar，并网点电压幅值再次跌落至0.9pu。

由此可见，构网型储能和分布式调相机可协同稳定运行，支撑弱电网下新能源场站稳定运行、提升场站并网容量。

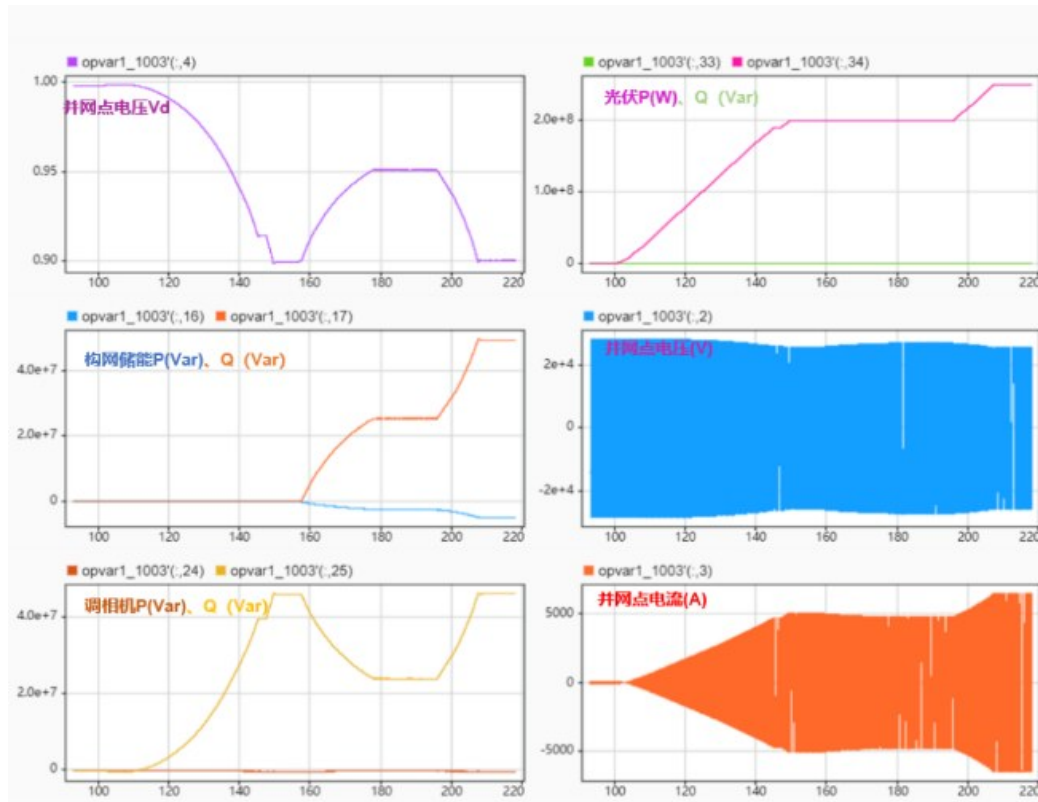


图 16 复合构网设备辅助光伏场站接入弱电网仿真波形

Fig.16 Waveforms of Photovoltaic Station Integrated into Weak Grid with Composite Grid-Forming Device

5 结 论

本文面向弱电网应用场景下新能源场站的惯量支撑与发电量存储需求，搭建了含新能源、构网型储能、分布式调相机的半实物仿真系统，在弱电网场景下对比了构网型储能与分布式调相机的暂态响应特性及其对新能源场站的支撑效果，提出了构网

型储能+分布式调相机的多元复合主动支撑方案，并通过仿真验证了多元惯量复合主动支撑方案的可行性与有效性，主要结论如下：

1) 构网型储能暂态响应特性与分布式调相机相近，具有可媲美分布式调相机的技术潜力，但构网型储能尚处于应用初期，大规模替代调相机的方

案仍需大量现场工程实践加以验证；

2) 在弱电网场景下, 构网型储能与分布式调相机均可提升新能源场站的并网容量, 提升新能源场站的并网发电量;

3) 构网型储能+分布式调相机的多元复合主动支撑方案, 能够充分融合构网型储能与分布式调相机的性能优势, 通过有功功率与无功功率互济, 可实现电压与频率支撑互补, 保障电网安全稳定的同时兼具电量存储能力, 满足新能源场站惯量支撑设备的多样化应用需求。

本文基于半实物仿真平台, 研究论证了构网型储能替代分布式调相机的技术经济可行性, 初步探索了“构网型储能+分布式调相机”多元复合主动支撑方案的有效性; 该方案融合两类惯量支撑设备的性能优势, 可优化系统整体运行性能、降低工程建设成本, 为新型电力系统下新能源基地惯量支撑设备的规划配置提供了新的解决方案。

参考文献

- [1] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
SUN H D, XU T, GUO Q, et al. Analysis on Blackout in Great Britain Power Grid on August 9th 2019 and Its Enlightenment to Power Grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [2] 郭琦, 王庆红, 谭伟涛, 等. “4·28”西班牙、葡萄牙大停电事故分析及对我国电网的启示[J]. 南方电网技术, 2025, 19(08): 1-10.
GUO Q, WANG Q H, TAN W T, et al. Analysis on Blackout in Spanish and Portuguese Power Systems on April 28th 2025 and Its Enlightenment to Power System in China[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(08): 1-10.
- [3] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172 - 179.
WANG X B, GE J, HAN L S, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172 - 179.
- [4] 周勤勇, 李根兆, 秦晓辉, 等. 能源革命下的电力系统范式转换分析[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 1 - 11.
ZHOU Q Y, LI G Z, QIN X H, et al. Analysis of power system paradigm shift under energy revolution[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 1 - 11.
- [5] 汪宁渤, 马明, 强同波, 等. 高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 29-35, 50.
WANG N B, MA M, QIANG T, et al. High-penetration new energy power system development challenges opportunities and countermeasures[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 29-35, 50.
- [6] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
LI M J, CHEN G P, DONG C, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [7] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515-523.
LIU Y Q, CHEN L X, HAN X Q. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-523.
- [8] 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): 461-474.
XIE X R, HE J B, MAO H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [9] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
SHU Y B, ZHANG Z G, GUO J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [10] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
LI J L, DING Z Y, YOU H H, et al. Research on stable operation of new power system supported by Grid-forming energy storage system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 1-11.
- [11] 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 Q, LI Z Q. A review of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [12] 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): 2688-2702.
YANG H, LIU H, DING Z H, 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): 2688-2702.
- [13] 省天骄, 李积泰, 权慧娟, 等. 适应高比例新能源直流外送输电能力提升的分布式调相机配置方法研究[J]. 青海电力, 2023, 42(2): 1-7.
SHENG T J, LI J T, QUAN H J, et al. Research on the configuration method of distributed synchronous condenser adapted to the improvement of high proportion of new energy DC transmission capacity[J]. Qinghai Electric Power, 2023, 42(2): 1-7 (in Chinese).
- [14] 李志强, 何凤军, 郭强, 等. 青南新能源集中送出地区动态无功补偿方案对比研究[J]. 现代电力, 2021, 38(1): 87-93.
LI Z Q, HE F J, GUO Q, et al. Comparative Study on Dynamic Reactive Power Compensation Schemes in Qingnan New Energy Concentrated Transmission Area[J]. Modern Power, 2021, 38(1): 87-93 (in Chinese).
- [15] 王奇. 新型分布式调相机无功特性分析及协调控制策略研究[D]. 新

- 疆大学,2023.
- WANG Q. Research on reactive power characteristics and coordination control strategy of new distributed synchronous condenser[D].Xin Jing University,2023.
- [16] 张显忠. 大容量调相机对系统电压稳定影响及其无功支撑优化研究[D]. 沈阳工业大学,2023.
- ZHANG X Z. Research on the Influence of Large Capacity Dimmer on System Voltage Stability and Optimization of Reactive Power Support[D]. Shenyang University of Technology,2023.
- [17] 林一凡. 分布式调相机对高比例风电系统电压安全稳定影响研究[D]. 华北电力大学,2024.
- LIN Y F. Research on the Impact of Distributed Static Var Compensators on Voltage Safety and stability in High-proportion Wind Power Systems[D]. North China Electric Power University, 2023.
- [18] 李明,亚夏尔·吐尔洪,郑云平. 构网型储能支撑高比例新能源并网稳定运行技术[J]. 热力发电,2025,54(3):59-68.
- LI M , TUERHONG Y, ZHENG Y P. Stable operation technology for high proportion of new energy connected to power grid supported by grid-forming energy storage[J]. Thermal Power Generation ,2025,54(3):59-68.
- [19] 刘 辉,于思奇,孙大卫,等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025,45(01) :1-16.
- LIU H, YU S Q, SUN D W, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025,45(01) :1-16..
- [20] 王 伟,周少泽,黄萌. 构网型技术:演进历程、功能定位与应用展望[J], 电力系统自动化,2025,49(1):1-13
- WANG W , ZHOU S Z, HUANG M. Grid-forming Technologies: Evolution History, Function, and Application Prospects[J], Automation of Electric Power Systems. 2025,49(1):1-13
- [21] 刘静佳,苏新凯,赵璐璐,等. "锂电+超级电容"混合构网型储能仿真分析及实证研究[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(7): 2675-2688.
- LIU J J, SU X K, ZHAO L L, et al. Simulation analysis and verification research on the hybrid-gfm energy storage system with "lithium batteries + supercapacitors"[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(7): 2675-2688.
- [22] 黄萌,凌扬坚,耿华,等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. 高电压技术,2023,49(11): 4571-4583.
- HUANG M, LING Y J, GENG H, et al. An Overview on multi-VSCs interaction analysis and stability controls of grid-forming converters with power synchronization control[J]. High Voltage Engineering,2023,49(11):4571-4583.
- [23] 贾科,刘芸,毕天姝,等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型新能源电源不对称故障穿越控制[J]. 中国电机工程学报, 2024:1-11.
- Jia K, Liu Y, Bi T S , et al. asymmetric fault ride through of grid-forming control of renewable energy based on adaptive virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024:1-11.
- [24] 尚磊,胡家兵,袁小明,等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 403-412.
- Shang L, Hu J B, Yuan X M, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 403-412.

附录 1

表 1 构网型储能与分布式调相机暂态特性量化对比表

测试工况	设备	电压最大值(pu)	电压最小值(pu)	频率最大值(Hz)	频率最小值(Hz)	有功功率响应时间(ms)	有功功率振荡恢复时间(ms)	无功功率响应时间(ms)	无功功率振荡恢复时间(ms)
低电压穿越-三相	分布式调相机	1.081	0.575	50.61	49.69	4	2194	1	1230
	构网型储能	1.085	0.543	50.3	49.83	4	602	1	158
低电压穿越-单相	分布式调相机	1.035	0.858	50.018	49.93	3	10	5	99
	构网型储能	1.026	0.873	50.068	49.93	3.8	312.5	9	36.5
高电压穿越-三相	分布式调相机	1.154	0.954	50.11	49.91	6	41	7	95
	构网型储能	1.126	0.989	50.12	49.88	6	139	7	42
高电压穿越-单相	分布式调相机	1.049	0.983	50.03	49.96	5	610	10	84
	构网型储能	1.04	0.995	50.05	49.93	5	630	10	46
连续故障穿越-20%-130%-20%	分布式调相机	1.266	0.578	50.58	49.74	4	704	1	70
	构网型储能	1.263	0.578	50.51	49.7	4	38	1	55
连续故障穿越-20%-20%	分布式调相机	1.081	0.575	50.61	49.68	4	2894	5	491
	构网型储能	1.085	0.543	50.47	49.81	4	750	5	53
频率波动故障-48Hz	分布式调相机	0.998	0.997	50.00	47.99	54	1146	49	593
	构网型储能	1.002	1.000	50.00	47.99	54	244	37	102
频率波动故障-52Hz	分布式调相机	0.997	0.998	52.01	52.01	48	1517	21	309
	构网型储能	0.999	1.001	49.98	49.98	48	247	22	16
低频振荡抑制	分布式调相机	0.997	0.998	50.128	49.88	146	996	99	97
	构网型储能	0.999	1.009	50.1	49.89	104	554	149	5
相角跳变	分布式调相机	1.017	0.843	50.68	49.34	2	1800	2	913
	构网型储能	1.048	0.852	50.23	49.78	2	844	2	69