

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231340

# “双碳”背景下受端电网火电机组增加调相功能关键技术

付红军<sup>1</sup>, 孙冉<sup>1</sup>, 王建波<sup>1</sup>, 王湘<sup>2</sup>, 李海波<sup>2</sup>

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450018; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

**摘要:** 随着新型电力系统推进建设, 受端电网逐步形成了高比例可再生能源和高比例跨区直流接入的典型特征。在发生直流闭锁、换相失败等故障情况下, 受端电网暂态电压支撑需求骤增。由于同步电源开机占比逐渐降低, 动态无功资源缺口逐渐加大。静止无功补偿能力较弱, 新建调相机成本较高, 利用存量火电机组增加调相功能成为技术经济的最优选择。首先分析了“双高”型受端电网的暂态电压支撑需求和调相机的电压支撑机理, 并对国内外火电机组增/改调相功能的案例进行了综述。在此基础上, 基于河南鸭河口火电机组增加调相功能工程实践, 提出了火电机组增加调相功能的关键技术, 开辟了一条面向高比例可再生能源接入的受端电网电压暂态支撑能力和存量火电机组利用率提升的有效技术路径。

**关键词:** 双碳背景; 受端电网; 火电机组; 调相机; 支撑机理

## Key technologies of adding a condenser function in thermal power units in the receiving end power grid given a background of carbon peak and neutrality

FU Hongjun<sup>1</sup>, SUN Ran<sup>1</sup>, WANG Jianbo<sup>1</sup>, WANG Xiang<sup>2</sup>, LI Haibo<sup>2</sup>

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450018, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

**Abstract:** As the proportion of renewable energy increases, the receiving-end power grid has gradually formed the typical characteristics of a high proportion of renewable energy and a high proportion of inter-regional DC connection. In the event of DC blockage and commutation failure faults, the demand for voltage support of the receiving-end grid increases greatly. As the proportion of synchronous power gradually decreases, the gap of dynamic reactive power resources gradually increases. The static var compensation capability is weak and the cost of building a new generation condenser is high. Thus adding condenser function in existing thermal power units has become the best technical and economic choice. This paper first analyzes the transient voltage support requirements of the receiving-end power grid and the mechanism of that support by the condenser. A review of domestic and foreign cases of adding/modifying condenser function in thermal power units is provided. Based on the engineering practice of adding condenser function in thermal power unit in the Yahekou power plant, key technologies are proposed for adding condenser function in thermal power unit. An effective technical path is proposed for the improvement of transient voltage support capacity of the receiving end grid in these conditions.

This work is supported by the Science and Technology Plan of Sichuan Province (No. 2023YFSY0032).

**Key words:** background of carbon peak and neutrality; receiving-end power grid; thermal power units; synchronous condenser; support mechanism

## 0 引言

近年来, 随着我国“双碳”目标的深入实施, 形成大规模新能源集群接入电力系统的新发展格

局<sup>[1-6]</sup>。在高比新能源接入电网的过程中, 由于新能源主要集中在我国西部地区, 大规模跨区直流输电成为了新能源开发的典型模式之一<sup>[7-9]</sup>。随着新型电力系统加快构建, 新能源高比例接入、大容量跨区直流输电成为电网典型特征<sup>[10-11]</sup>。

随着高比例新能源发电经过特高压直流接入到

基金项目: 四川省科技计划项目资助(2023YFSY0032)

受端电网,受端电网原来的同步发电机被逐渐替代,开机时间减少,导致受端电网动态无功源不足,同时随着受端电网本地大量新能源的接入,动态无功源进一步减少<sup>[12]</sup>。受端电网在交流侧故障冲击下可能发生电压失稳,特高压直流通常会因为故障或者换相失败导致闭锁,潮流发生大范围转移,这种情况下受端电网汇入母线处会出现大幅度的电压波动或者电压下降甚至电压崩溃<sup>[12-20]</sup>,即使系统恢复稳定,也存在较长时间的电压过渡期,期间电压稳定裕度不足,系统需要动态无功补偿装置提供大量的无功功率对电压进行支撑。

目前广泛采用的无功补偿装置包括静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)两类。SVC的无功响应时间在20 ms左右,STATCOM无功响应时间在50~100 ms左右<sup>[21-22]</sup>。静止无功补偿设备在动态响应速度方面无法完全满足暂态电压支撑需求,无法在交直流系统出现故障时对系统电压起到有效支撑作用。

同步调相机可实现无功功率连续、快速、无差控制,特别当电网发生故障后,能够及时为电网提供无功功率,提高电网运行的稳定性<sup>[23-24]</sup>。当系统电压发生大幅跌落时,调相机可瞬时发出大量无功功率,降低特高压直流换相失败几率,同时具备短时发出2倍额定容量以上的无功功率的能力,有助于系统电压快速恢复,防止电压崩溃。

火电机组作为一种旋转设备,通过改造增加调相功能之后,具有可靠的动态无功支撑能力。受端电网由于高比例新能源挤占火电机组开机容量,造成了火电机组利用率降低,通过对这些闲置机组改造增加调相运行功能,能够解决资产闲置浪费的问题。在推动“双碳”目标实现过程中,大量火电机组进入到退役期,对这些退役的火电机组进行增加调相功能改造,相比于建造新一代调相机<sup>[25-28]</sup>的高昂经济成本,能够以低成本实现受端电网电压支撑能力提升。随着未来新能源比例持续升高和火电机组退役潮的到来,这一技术路径具有极为广阔的应用前景和发展潜力。

目前火电改调相机技术还处于起步和示范阶段,国内外相关的技术研究和实践经验均较为匮乏。本文以河南省鸭河口火电厂机组增加调相功能工程为例,对受端电网动态无功支撑需求、调相机动态电压支撑效果、火电机组改调相机的国内外研究现状进行综述,系统性地提出了火电机组改调相运行的关键技术,为今后火电机组改造提供了相关的理

论技术支撑和实践参考。

## 1 新型受端电网暂态电压支撑需求与调相机支撑机理

### 1.1 受端电网电压支撑需求

目前高比例可再生能源发电受端电网电压稳定水平和调节能力下降的情况普遍存在,电网无功支撑需求进一步扩大。一般新能源场站会配备一定比例的动态无功补偿装置,对并网节点的电压和功率因数进行控制<sup>[29-33]</sup>,但由于装备性能、控制策略等原因,在电网出现交直流复杂故障之后,上述无功补偿设备难以向电网提供足够的无功功率以支撑电网电压<sup>[34-38]</sup>。

以河南电网为例,作为华中区域主要受端系统,同时馈入两回特高压直流,复杂的耦合特性给电网安全稳定运行带来巨大挑战,叠加上因火电机组关停导致系统动态无功支撑能力降低,带来了受端电网电压稳定问题。在郑州负荷中心近区500 kV线路三永故障N-1或同杆并架N-2故障后,特高压直流馈入功率较大,火电机组开机方式不足时,不能支撑无功需求,引发连锁反应,导致河南电网电压崩溃,部分方式下,华中全网电压崩溃<sup>[39]</sup>。

受端电网由于大容量特高压直流馈入、本地高比例新能源发电接入和传统火电机组开机容量削减三大因素的影响,系统的动态无功支撑能力大幅减弱,在面临交直流系统各类故障时无法有效支撑系统电压,可能造成系统电压失稳,系统具有很强的动态无功支撑需求,因此提升高比例新能源受端电网的动态无功支持能力成为迫切需求。

### 1.2 调相机对暂态电压的支撑机理

调相机接入后对受端电网的动态电压支撑主要分为两部分。第一部分是故障发生瞬间,电压跌落,调相机励磁系统还未来得及作出反应,机端电压的变化经过绕组互感瞬间激发出数倍的无功电流,随后无功电流呈指数衰减趋势,大约在2.5 s衰减至10%以下。第二部分是励磁控制系统响应进行强励,能够很好地补充自发响应无功的衰减特性,实现对电网电压的持续支撑。

接入调相机后特高压直流受端电网的等值电路如图1所示。

系统发生直流闭锁或直流换相失败等故障下的换流母线无功缺额 $\Delta Q'$ 为

$$\Delta Q' = (1 - \Delta U_{\text{acp}})^2 Q_{\text{acp}} - Q_{\text{Sycp}} \quad (1)$$

式中: $\Delta U_{\text{acp}}$ 为换流母线相电压变化量; $Q_{\text{acp}}$ 为直流母线处的无功功率; $Q_{\text{Sycp}}$ 为调相机提供的无功功率。

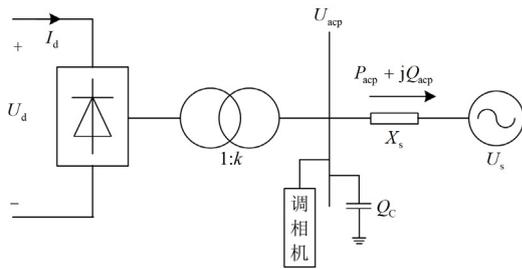


图 1 接入调相机后受端系统等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the receiving end system after accessing the condenser

接入调相机后直流闭锁故障下的换流母线暂态电压的表达式为

$$U'_{acp} = U_{acp} - \frac{U_{acp} + 2Q_{acp}X_s - \sqrt{U_{acp}^2 + 4U_{acp}(Q_{acp} - Q_{Sycp})X_s}}{2Q_{acp}X_s} \quad (2)$$

式中： $U_{acp}$ 、 $U'_{acp}$  分别为直流闭锁故障前后换流母线暂态电压； $X_s$  为电网等值电抗。该式反映了调相机接入后对受端电网换流母线处暂态电压的动态支撑机理。

在理论分析的基础上，建立了同步调相机支撑受端电网电压的时域仿真模型。设定系统在 1.5 s 于换流母线处发生故障，导致母线电压跌落，仿真结果如图 2—图 4 所示。

可以看出，在系统发生故障后瞬间，无功输出迅速上升，换流母线处系统电压得以在极短的时间

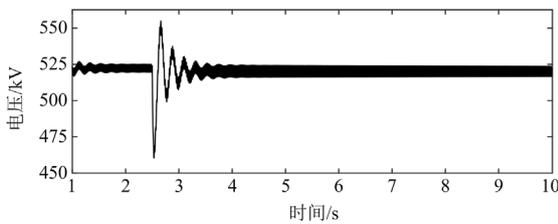


图 2 故障后电压动态响应曲线

Fig. 2 Voltage dynamic response curve after fault

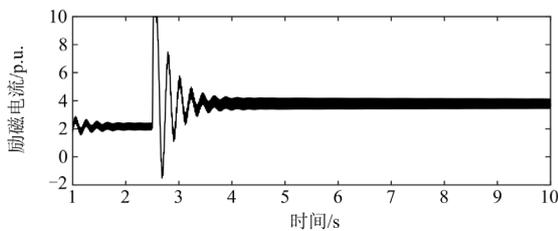


图 3 故障后励磁电流动态响应曲线

Fig. 3 Dynamic response curve of excitation current of condenser after fault

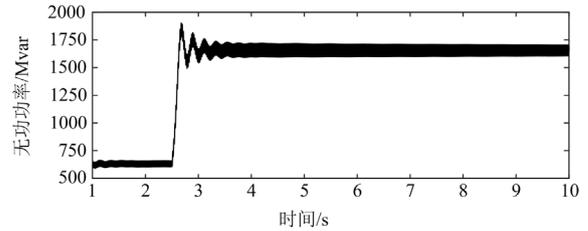


图 4 故障后调相机无功功率动态响应曲线

Fig. 4 Dynamic response curve of reactive power of condenser after fault

快速恢复，这是调相机动态支撑的第一部分。随后，调相机输出的无功功率开始回落，励磁控制系统进行强励增大励磁电流，持续输出无功，这是调相机动态支撑的第二部分。通过仿真，验证了前述调相机分两步动态支撑受端电网电压的机理。

## 2 火电机组改调相机研究现状与应用实践分析

### 2.1 国内外研究现状

目前国内外关于火电机组改调相机功能的相关理论研究和工程实践都还比较缺乏。文献[40]针对火电机组增加调相机功能所涉及的励磁系统改造设计问题进行了初步探讨。文献[41]提出为励磁系统配置限制环节以保证调相机安全稳定运行。文献[42]提出了一种新型燃气-蒸汽联合循环调峰/调相电站设计方案，能够实现机组在调峰和调频两种模式之间的灵活切换。文献[43]针对山东电网大量火电机组退役带来的电压稳定问题，提出将退役机组改调相运行以支撑系统电压稳定。

通用电气公司对美国克利夫兰附近运行了 62 年的 Eastlake 燃煤电厂退役机组进行改造，使其运行在调相机状态，对克利夫兰地区电网提供动态和静态电压支撑。德国和加州的一些地区也进行了类似的改造工程<sup>[44]</sup>，英国 Deesid 电厂对两台燃气发电机进行改造，使其作为调相机为电网提供惯性支撑<sup>[45]</sup>。

除了火电机组改调相机以外，目前在水电和抽蓄机组改调相机功能方面国内外也有一些初步的研究<sup>[46-50]</sup>，这些研究内容对于火电机组改调相机具有一定的启发意义，具体内容在此不再赘述，可参考相关文献。

综上所述，目前国内外都在发电机改调相机功能方面开展了初步的研究和一些少量的工程实践，但是针对低开和退役火电机组改调相机或增加调相运行功能这一领域尚未形成完善的工程实践理论体系，具备较大的挖掘空间。

## 2.2 应用实践案例分析

### 2.2.1 改造背景

河南省作为火电大省, 随着能源结构变化, 一批老旧火电机组面临淘汰转型, 随着特高压电网的发展和新能源大规模持续并网, 对系统电压稳定提出全新挑战, 传统的无功补偿方式难以满足电网的发展和安全稳定运行需要, 急需新增一批调相机运行。

为保障新能源消纳, 火电机组被迫长期运行于深度调峰状态, 2021年河南火电机组深度调峰天数达310天, 统调火电机组平均利用小时数3171h。部分应急备用机组每年只在夏季高峰和冬季供暖不

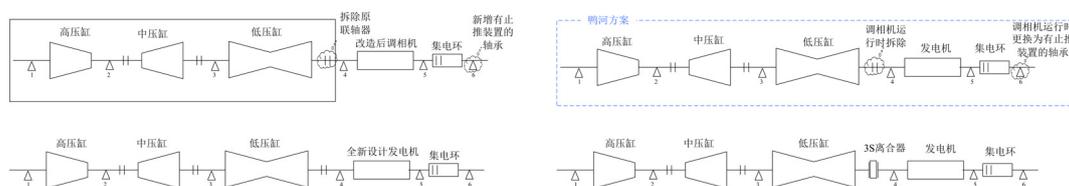


图5 改造方案布置图

Fig. 5 Retrofit plan layout

### 2.2.3 经济效益与应用效果

目前新建一台300 Mvar的调相机投资约1.6亿元, 而同样容量的火电机组调相改造投资约为3500万元, 火电机组增加调相功能可大幅降低成本。新建调相机工期约24个月, 而调相改造仅需8个月, 工期短、见效快, 适应性更强。

现阶段调相运行的补偿标准为15元/(Mvar·h), 按照每年运行7个月, 该机组可以得到2268万元的补偿费用。改造后, 每日消耗电量减少3.5万kWh, 每年收益从114万元增加到453万元。

鸭河口电厂2号机组利旧改造增加调相机运行, 对系统静态电压稳定、换相失败后网压恢复、区域网压波动抑制、直流功率提升方面都有显著效果。

河南电网天中直流换流站、青豫直流换流站、南阳特高压交流站等电网重要节点的分布示意图6所示。

基于仿真技术将直流近区10台退役或关而不拆机组增加调相功能, 可验证火电机组改调相机改造在实际应用中具有以下效果。

#### 1) 提升直流受电功率

改造前后, 直流近区故障下的母线电压与直流功率波动情况如图7所示。

由图7可以看出, 通过火电机组增加调相功能, 在发生直流近区故障后, 换流站母线电压能够更快恢复, 直流有功功率和无功功率也更加平稳。

退役机组增加调相功能后, 对直流功率具有显著的提升效果, 以天中+青豫直流输电功率分别为

足时开机运行, 不同程度上存在国有资产的闲置和浪费。

### 2.2.2 实践案例简介

鸭河口电厂临近特高压直流站点, 靠近特高压交流站点, 是豫西南电网的重要电源电压支撑点, 区域支撑作用效果明显。综合鸭河机组情况及电网需求对比多种方案, 最终确定鸭河口改造方案为: 保留发电功能, 新增调相功能, 停机切换发电、调相模式。该方案改造难度小、费用低, 一台30万kW机组改造费用约3500万元, 适应性广, 改造方案布置如图5所示。

8500 MW和9500 MW两种运行方式为例, 具体的直流受电能力提升情况如表1所示。

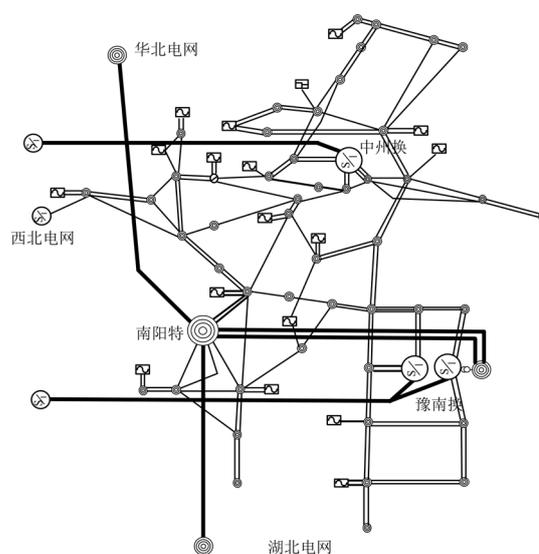
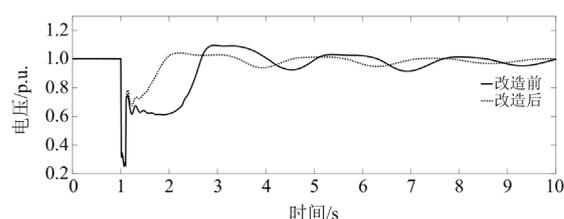


图6 河南电网重要节点地理分布图

Fig. 6 Geographic distribution of important nodes of Henan power grid



(a) 中州换500 kV母线电压

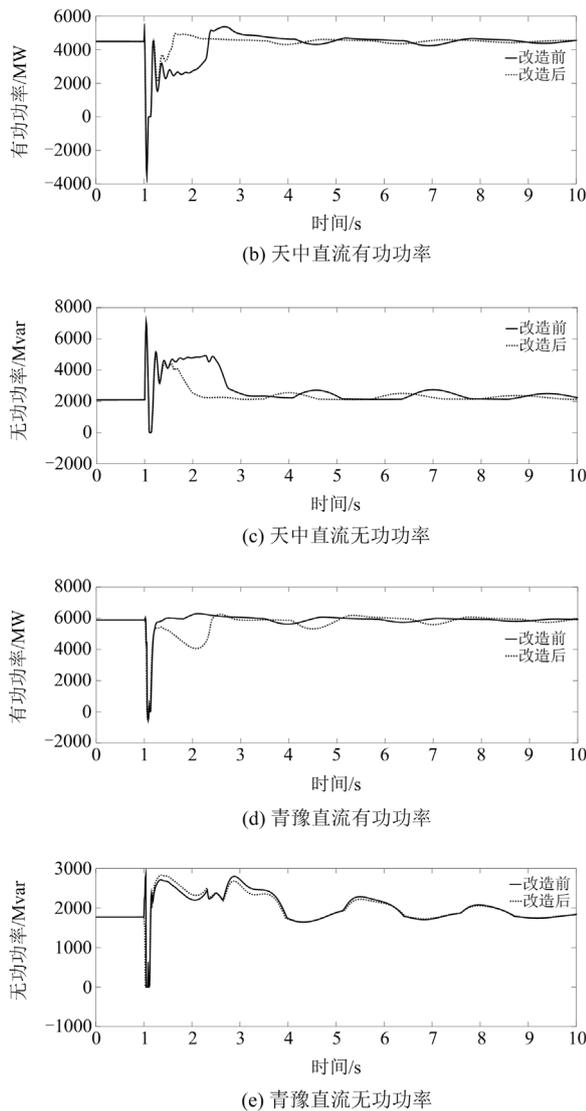


图7 直流近区故障后电压和功率恢复情况

Fig. 7 Recovery of voltage and power after near-field DC faults

表1 退役机组增加调相功能后对直流功率的提升效果

Table 1 Effect of increasing the DC power after adding the phase modulation function in the decommissioned units

天中+青豫直流功率/MW		直流受电能力提升/MW
改造前	改造后	
8500	12 000	3500
9500	12 500	3000

可以看出, 通过将火电机组增加调相功能, 电压失稳制约直流功率的问题得到极大的缓解, 直流功率可提升 300~350 万 kW。

2) 提升灵活性与稳定性

河南电网 2021 年发生新能源弃电最大功率 360 万 kW, 通过火电机组增加调相功能改造, 可以提升

春秋季新能源消纳能力 150~300 万 kW。

退役机组改为调相机后, 直流多馈入短路比变化如表 2 所示。

表 2 退役机组增加调相功能前后直流多馈入短路比

Table 2 Short-circuit ratio of DC multi-infeed increases after adding phase modulation function in the decommissioned units

馈入有效短路比	天中	青豫高端	青豫低端
改造前	5.00	3.61	4.13
改造后	5.25	3.78	4.29

可以看出, 火电机组改为调相机运行后, 天中直流多馈入有效短路比增加 0.25, 青豫直流高端多馈入有效短路比增加 0.17, 青豫直流低端多馈入有效短路比增加 0.16。

3 火电机组改调相机功能关键技术分析

作为火电机组的同步发电机天然具备调相运行的能力, 火电机组改调相机功能主要是在技术参数和控制系统上进行针对性的设计, 以适应特高压直流受端电网快速动态无功支撑需求。同时在待改造火电机组选择布局方面也需要有相应的配套技术和方案。

本文详细阐述了火电机组改调相机功能的关键技术, 主要涉及装备技术、控制技术、规划布局几个方面。在装备技术方面, 主要考虑对发电机本体和励磁系统的改造; 在控制技术方面, 围绕启动控制、强励控制、励磁控制策略以及调相控制技术 4 个方面展开; 在调相机规划布局方面, 首先筛选适宜改造的区域, 再分析具体区域内火电机组的选择和布局。

3.1 火电机组改调相机关键装备技术

对于火电机组改调相机的装备技术, 需要从发电机本体和励磁系统两个方面进行分析, 设计的改造部分如图 8 所示。

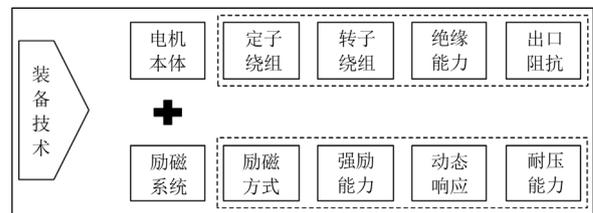


图 8 火电机组增/改调相机功能装备技术框图

Fig. 8 Equipment technical block diagram of adding/changing condenser function in thermal power units

3.1.1 发电机本体改造技术

目前电网运行的调相机是根据电网动态稳定需

求专门设计的, 相比于常规汽轮机组, 相关参数要求更加严格。在火电机组改调相机过程中, 对火电机组本体进行改造是很关键的一步。对火电机组本体的改造主要包括机组的直轴稳态电抗、直轴暂态电抗、直轴次暂态电抗、直轴开路时间常数和直轴短路时间常数, 这些参数主要影响调相机对电网电压动态支撑的第一部分, 关系到响应的快速性问题。除此之外还有转子过载倍数与过载持续时间、定子过载倍数与定子过载持续时间, 这几个参数反映的是调相机承受强励顶值输出大量无功的能力, 与调相机对电网电压动态支撑的第二部分密切相关。

改造后, 调相机出口短路阻抗要小于发电机出口短路阻抗。调相机降容使用可以将相关装备保持原状而不进行重新设计, 这样可以保证相近的稳态性能, 但是暂态响应性能会较差。为提高暂态响应速度, 有学者指出, 在设计中可以采用出口升压变压器短路阻抗较小的方案, 这种方式能够降低改造的成本, 同时能够提高效率。

### 3.1.2 励磁系统改造技术

火电机组改调相机的励磁系统主要负责提供稳定的磁场, 通过调整励磁电流大小, 来满足不同条件下的无功输出需求。在设计励磁系统时需要考虑系统的稳定性、响应速度和可靠性等方面。相比于火电机组, 调相机的励磁系统需要有更快的动态响应速度和更高的强励顶值, 因此需要针对励磁系统能量单元的绝缘耐压能力进行改造, 以适应这两方面的需求。包括主励磁变的设计选型和功率单元晶闸管的选择都需要有针对性的改进。

火电机组改调相机, 不同场景下选择的励磁系统会有所不同, 对于励磁能量单元的选择需要遵循表 3 所示原则。

表 3 励磁方式选择对比

Table 3 Comparison of excitation mode

机组类型	励磁方式	选择依据
小型火电机组	直流励磁系统	结构简单, 易维护, 成本低
中小型火电机组	交流励磁系统	可满足大部分中小型机组需求
大型火电机组	静态励磁系统	精度高、稳定性好、动态性能优越、成本相对较低

也有学者指出对于大部分退役火电机组应该考虑使用静态励磁系统。原因在于: 静态励磁系统采用了励磁变压器, 能够减少“时滞”, 提升系统的响应速度。同时静态励磁系统不存在旋转部分, 接线以及设备比较简单, 可靠性较高。

## 3.2 火电机组改调相机控制技术

火电机组改调相机运行的控制技术主要涉及调

相机启动控制技术、高强励倍数控制技术和励磁控制策略, 主要技术参数需求如图 9 所示。

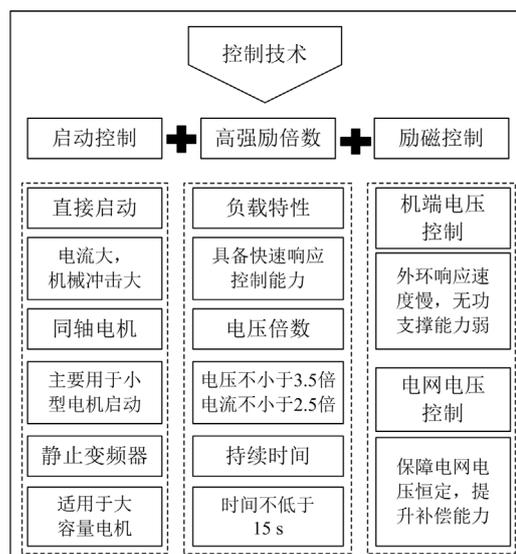


图 9 火电机组增/改调相功能控制技术框图

Fig. 9 Control technical block diagram of adding/changing condenser function in thermal power units

### 3.2.1 启动控制技术

调相机作为空载运行的同步电动机, 其常见的启动方式包括直接启动、同轴电机启动和静止变频器(static frequency converter, SFC)启动 3 种。直接启动会在电机定子线圈产生很大电流, 带来大的机械冲击, 容易损坏电机; 同轴电机启动一般只适用于容量较小的机组; 对于大型机组, 应当采用 SFC 启动。因此, 火电机组在改调相机时考虑利用 SFC 作为启动装置。SFC 启动主要有两种方式<sup>[51-52]</sup>:

1) SFC 将调相机速度增加到同步转速后, 退出运行, 调相机进行并网;

2) SFC 将调相机速度拖动至 1.05 倍额定转速, SFC 系统退出, 机组在电网牵引下转速逐渐调整为同步转速。

### 3.2.2 高强励倍数控制技术

调相机需要根据系统的无功需求进行快速的动态响应, 在机端电压下降时, 要进行强励以支撑无功输出。实际上调相机强励电压比和调相机的无功输出特性呈正相关, 而欠励电压比与其呈负相关, 因此在高强励倍数控制中要保证足够快的动态响应。

对于强励倍数的设计应该考虑系统负载特性、控制精度、设备性能限制以及暂态需求。为满足这些需求, 在调相机机端电压为 0.8 倍额定电压时, 对应的励磁系统强励电压倍数应该不小于 3.5, 强励电流倍数不小于 2.5, 允许强励时间不低于 15 s。

励磁倍数的大小与调相机的容量、定子电流、励磁电流等参数相关，在对火电机组改造时需要进行相应的适应性改造。同时还应考虑负载需求以及调相机运行的实际情况。

### 3.2.3 调相机励磁控制策略

调相机在运行过程中需要不断调节励磁电流以维持电网电压的稳定，从而实现无功动态补偿，目前调相机的励磁控制策略通常分为机端电压调节控制和电网电压调节控制两种<sup>[53]</sup>，两种控制方式对比如表 4。

表 4 控制方式对比

Table 4 Comparison of control methods

控制方式	内环		外环		优缺点
	控制量	响应速度	控制量	响应速度	
机端电压控制	机端电压	较快	无功功率	慢	无功支撑能力较弱
电网电压控制	电网电压	快	机端电压	较快	保证电网电压恒定，最大限度地发挥调相机无功补偿能力

机端电压调节控制采用外环无功功率、内环机端电压的双闭环控制策略，其中内环响应速度较快，外环响应速度慢，无功支撑能力较弱。电网电压调节控制相比于机端电压调节控制增加了电网电压环节，从而保证电网电压的恒定，最大限度地发挥调相机无功补偿能力。

在火电机组改调相运行的过程中，需要针对励磁控制策略及控制参数做相应的调整，以保证动态响应速度和稳态支撑能力。

### 3.3 火电改调相机规划布局技术

不同的退役火电机组具有不同的改调相机的潜力，并不是所有退役火电机组都可以通过改调相功能的方式实现二次利用，在进行改造之前应当综合考虑其所处电网区域是否存在动态无功不足的情况，明确改造价值。若退役电厂所处电网区域临近特高压直流或本地新能源发电馈入位置，原有无功源所能提供的动态无功支撑不足，无法维持直流闭锁、换相失败等故障下的系统电压稳定，则可以考虑将该区域内退出电网运行的火电机组重新以调相机运行方式启用，为区域电网提供动态无功支撑，充分利用自身价值。

火电机组改调相机的布局需要根据多方面因素进行综合考虑和设计。为了保证火电机组改调相机功能的安全可靠性，并且考虑到暂态电压稳定对电力系统稳定性的影响，保障电网稳定运行并且能够消纳一定的新能源，可以选择电压薄弱、新能源消

纳能力较强、经济性比较高以及电力交易市场活跃的地区进行改造。不同地区火电改调相运行的电压支撑能力对比如图 10 所示。

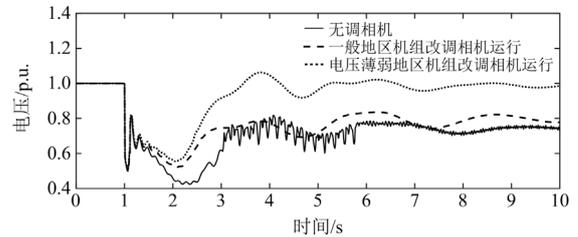


图 10 不同火电机组改造调相机对暂态电压的影响

Fig. 10 Influence of transformer on transient voltage of different thermal power units

从图 10 可以看出，在电压薄弱地区开展火电改调相机运行具有显著调节效果。不同于频率的全局特性，电压具有显著的分区分层特性，调相机布置的位置对电压支撑效果有很大影响，因而在选择哪些火电机组进行改造的问题上，需要考虑无功需求的分布情况。如何筛选合适的火电机组改调相运行，可以从系统节点分区、电压薄弱节点筛选和动态无功需求判断几方面进行，详细路线如图 11 所示。

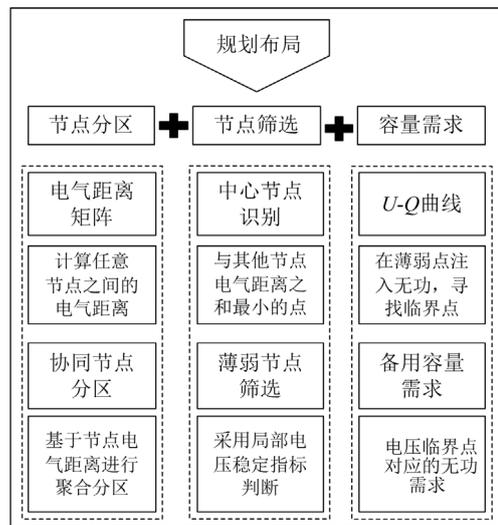


图 11 火电机组增/改调相功能规划布局框图

Fig. 11 Layout block diagram of adding/changing condenser function in thermal power units

#### 3.3.1 系统节点分区

电力系统节点众多，如果对每一个节点都进行分析，必然面临巨大运算难题，考虑到部分临近节点之间电气距离较近，具有较大的耦合强度，因此引入聚类分析的思想，对耦合程度高的节点进行分区。

具体的节点分区过程可以遵循以下原则和步骤：

计算节点电气距离, 构建电气距离矩阵<sup>[54-55]</sup>如式(3)所示。

$$Z_{ij, \text{equ}} = (Z_{ii} - Z_{ij}) - (Z_{ij} - Z_{jj}) \quad (3)$$

式中:  $Z_{ij, \text{equ}}$  为等值阻抗, 表示节点  $i, j$  的电气距离, 能够将节点之间的耦合程度量化;  $Z_{ii}$ 、 $Z_{jj}$  分别为节点  $i, j$  的自阻抗;  $Z_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的互阻抗。

1) 定义类间距离, 将距离小于该阈值的节点划分到一类;

2) 应用层次聚类分析法, 自下而上进行类与类之间的合并, 直到形成的分区数满足预设需求<sup>[56]</sup>。

层次聚类的分区如图 12 所示。

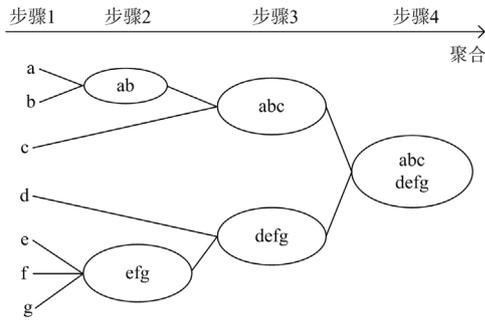


图 12 基于层次聚类的分区示意图

Fig. 12 Schematic diagram of partition based on hierarchical clustering

### 3.3.2 分区内关键薄弱节点筛选

在各个分区内首先需要识别出分区内的中心节点, 中心节点定义为与分区内其他所有节点电气距离之和最小的节点。在此基础上, 识别分区内的薄弱节点可以采用局部电压稳定指标( $L$  指标)<sup>[57]</sup>, 该指标由单线路模型推导得到并推广到更复杂的电力系统, 如图 13 所示。

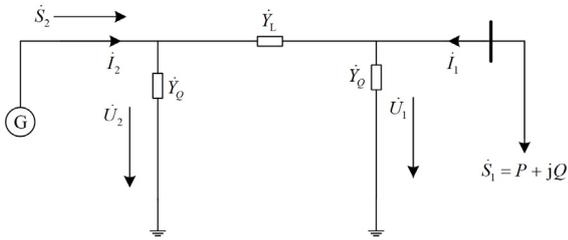


图 13 单线路模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of a single line model

$L$  指标的表达式为

$$L_i = \frac{\left| \sum_{j \in \alpha} \frac{Z_{ij} S_j}{\dot{U}_j} \right|}{U_i} \quad (4)$$

式中:  $L_i$  为节点  $i$  的局部电压稳定指标;  $\dot{U}_j$  为节点  $j$  的电压相量;  $U_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $S_j$  为节点  $j$  的复功率;  $\alpha$  为该分区内节点的集合。

根据该指标可以判定分区内的薄弱节点, 局部电压稳定指标综合考虑了节点负荷功率、节点阻抗以及节点电压等多种变量, 能够较好地反映节点电压稳定性。  $L$  指标与系统节点电压稳定性之间存在如下关系:  $L > 1$ , 节点电压稳定;  $L = 1$ , 节点电压临界稳定;  $L < 1$ , 节点电压不稳定。

### 3.3.3 分区动态无功备用容量需求计算

在分区内关键薄弱节点筛选之后, 需要根据系统电压稳定水平对各分区的有效动态无功备用进行量化。一般来说, 分区动态无功备用容量需求指的是无功补偿设备的最大输出容量和稳态输出容量之间的差值。

系统分区动态无功备用容量的计算方法可采用  $U-Q$  曲线法<sup>[58]</sup>。在分区的薄弱节点接入一台虚拟调相机, 调节机端电压  $U_f$ , 得到该节点注入的无功功率  $Q$ , 进而得到该节点的  $U-Q$  曲线, 如图 14 所示。

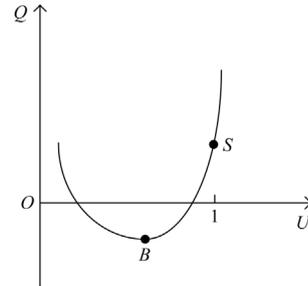


图 14 分区薄弱节点  $U-Q$  曲线

Fig. 14 Partition weak node  $U-Q$  curve

图中  $S$  点为稳定运行点,  $B$  点为系统电压崩溃临界位置。通过模拟薄弱节点电压跌落到  $B$  点, 此时分区内无功源输出即为最大有效无功输出, 系统的无功备用需求可以表示为

$$Q_{\text{bak}} = Q_{\text{max}} - Q_{\text{stb}} \quad (5)$$

式中:  $Q_{\text{bak}}$  为分区无功备用需求;  $Q_{\text{max}}$  为分区最大有效无功输出;  $Q_{\text{stb}}$  为分区稳态无功输出。

若系统现有无功源无法满足计算得到的无功备用需求, 则表明该分区内动态无功支撑不足, 可考虑将该区域内火电机组改调相机运行, 为区域电网提供动态无功支撑。

## 4 结论

在新型电力系统构建过程中, 受端电网动态电压无功平衡矛盾凸显, 火电通过增加调相功能将显

著改善上述问题。本文对“双碳”目标下受端电网火电机组增加调相功能的必要性、实施效果以及关键技术开展了全面综述,得出以下结论。

1) 我国可再生能源装机容量还将继续增加,预计到 2050 年,可再生能源发电量占比将超 80%,在这一历史进程中电力系统无功支持能力不足的问题将日渐凸显,受端电网对电压支撑的需求越来越多,要求越来越高,因此必须开展相关研究以提升无功补偿能力。

2) 在新能源高比例接入、挤占火电开机时间背景下,河南省在国内创新性地率先开展火电机组增加调相功能的示范工程。通过实践表明,火电机组增加调相功能相比于新建调相机组成本更低,同时能够增加火电机组的收益。

3) 通过分析发电机组调相运行和发电运行的差异,针对火电机组增/改调相功能涉及的发电机本体、励磁系统、控制技术以及调相机优化布局等关键技术进行了研究,建立了火电机组增/改调相功能关键技术体系。

同步调相机作为一种旋转型设备,具有优良的电压动态响应特性,能够适应高比例可再生能源和高压直流接入的受端电网对无功补偿的需求,火电机组增/改调相功能技术为同步调相机的大规模应用提供了一条经济可行的技术路径。本文研究成果可为高比例新能源接入的送端、受端电网调相机配置以及火电增加调相机功能等领域研究提供参考。

### 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] 马进,赵大伟,钱敏慧,等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.  
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [3] 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.
- [4] 王菲,李晖,杨林,等. 考虑大规模新能源接入的柔性直流电网容量规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 53-59.  
WANG Fei, LI Hui, YANG Lin, et al. Capacity planning method for flexible DC power grid considering access of large-scale new energy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 53-59.
- [5] 任冲,柯贤波,王吉利,等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 110-117.  
REN Chong, KE Xianbo, WANG Jili, et al. New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 110-117.
- [6] LI Shuaibing, LI Xinchun, KANG Yongqiang, et al. Load capability assessment and enhancement for transformers with integration of large-scale renewable energy: a brief review[J]. Frontiers in Energy Research, 2022.
- [7] 周孝信,鲁宗相,刘应梅,等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [8] 付红军,陈惠粉,李海波,等. 特高压交直流电网背景下新能源无功支撑能力分析[J]. 河南电力, 2020(增刊): 32-40.
- [9] 李惠玲,王曦,高剑,等. 新型电力系统背景下西部送端直流电网方案构建[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 12-21.  
LI Huiling, WANG Xi, GAO Jian, et al. Scheme construction for sending end DC grids in western China under the background of new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 12-21.
- [10] 张英杰. 构建以新能源为主体的新型电力系统的发展路径研究[J]. 电工技术, 2022(18): 172-174, 178.  
ZHANG Yingjie. Research on the development path of building a new electric power system based on new energy sources[J]. Electric Engineering, 2022(18): 172-174, 178.
- [11] 李惠玲. 新型电力系统背景下西部送端直流电网及系统运行特性[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 166-174.  
LI Huiling. Sending-terminal DC power grid in western China and its operation characteristics in the context of new power system[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 166-174.
- [12] 赵静波,孟侠,朱鑫要. 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 25-32.

- ZHAO Jingbo, MENG Xia, ZHU Xinyao. Research on synchronous condenser's influences on receiving-end provincial grid and its control strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(20): 25-32.
- [13] 郭培, 陈波, 高云超, 等. 基于 XGBOOST-PSO 提高受端电网电压暂态稳定的发电机无功优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 148-158.
- GUO Pei, CHEN Bo, GAO Yunchao, et al. A generator reactive power optimization method based on XGBOOST-PSO to improve the voltage transient stability of a receiving terminal network[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(13): 148-158.
- [14] 秦艳辉, 尹纯亚, 段青熙, 等. 直流近区系统故障下的暂态电压特性分析及支撑策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(17): 169-177.
- QIN Yanhui, YIN Chunya, DUAN Qingxi, et al. Research on transient voltage characteristics and support strategy under a fault occurred in the near-zone of HVDC sending system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(17): 169-177.
- [15] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变侧交流故障特性分析及协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 54-64.
- DENG Nan, HAO Liangliang, HE Jinghan, et al. AC fault characteristics analysis and coordinated control strategy on the inverter side of a receiving-end hybrid multi-Terminal HVDC system[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 54-64.
- [16] 何国庆, 王伟胜, 刘纯, 等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(一): 送端风电机组暂态无功电压建模[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(12): 4391-4405.
- HE Guoqing, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part I): transient reactive power and voltage modeling of wind powers in sending terminal grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12): 4391-4405.
- [17] 金一丁, 贺静波, 李光辉, 等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(二): 送端风电机组暂态无功电压特性与作用机理分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4738-4749.
- JIN Yiding, HE Jingbo, LI Guanghui, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part II): characteristics and mechanism analysis of transient reactive power and voltage of wind powers in sending terminal grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(13): 4738-4749.
- [18] 李光辉, 王伟胜, 何国庆, 等. 风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(三): 送端风电机组暂态过电压抑制措施[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(14): 5079-5089.
- LI Guanghui, WANG Weisheng, HE Guoqing, et al. Commutation failure of UHVDC system for wind farm integration (part III): transient overvoltage suppression measures of wind powers in sending terminal grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(14): 5079-5089.
- [19] LAN T, SUN H, ZHONG W, et al. LCC-HVDC's systematical impact on voltage stability: theoretical analysis and a practical case study[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 38(2): 1663-1675.
- [20] 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.
- [21] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(24): 77-81, 87.
- DING Lijie, DU Xinwei, ZHOU Weijing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(24): 77-81, 87.
- [22] 周建丰, 顾亚琴, 韦寿祺. SVC 与 STATCOM 的综合比较分析[J]. *电力自动化设备*, 2007, 27(12): 57-60.
- ZHOU Jianfeng, GU Yaqin, WEI Shouqi. Comprehensive comparative analysis of SVC and STATCOM[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(12): 57-60.
- [23] 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.
- [24] 李大虎, 李佳, 周悦, 等. 常规直流送端近区电网中调相机和柔性直流的无功协调控制[J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 148-160.
- LI Dahu, LI Jia, ZHOU Yue, et al. Reactive power-coordinated control of a synchronous condenser and VSC-HVDC in the sending-side near region power grid of an LCC-HVDC[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 148-160.
- [25] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. *电网技术*, 2018, 42(7): 2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. *Power System Technology*, 2018,

- 42(7): 2095-2102.
- [26] ZHOU G, WANG D, ATALLAH A, et al. Synchronous condenser applications: under significant resource portfolio changes[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(4): 35-46.
- [27] 王梦玲, 陈刚, 张超峰, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用[J]. 电工技术, 2020(8): 52-53, 56.  
WANG Mengling, CHEN Gang, ZHANG Chaofeng, et al. Application of a new generation of large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Electrical Engineering, 2020(8): 52-53, 56.
- [28] 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.
- [29] CAO D, ZHAO J, HU W, et al. Attention enabled multi-agent DRL for decentralized volt-VAR control of active distribution system using PV inverters and SVCs[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1582-1592.
- [30] 万易, 王建, 南东亮, 等. 基于变流器并网的新能源外送系统功率传输能力评估[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 171-183.  
WAN Yi, WANG Jian, NAN Dongliang, et al. Power transfer capacity evaluation of renewable energy delivery system based on grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 171-183.
- [31] KARAAGAC U, KOCAR I, MAHSEREDJIAN J, et al. STATCOM integration into a DFIG-based wind park for reactive power compensation and its impact on wind park high voltage ride-through capability[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 199: 107368.
- [32] 于其宜, 王琦, 汤奕. 考虑泄流效应的风电场并网点电压系统侧增援调控方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 30-39.  
YU Qiyi, WANG Qi, TANG Yi. System-side reinforcing dispatch and control method for grid-connected point voltage of wind farm considering drainage effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 30-39.
- [33] 佟曦, 侯朗博, 孙昊, 等. 高比例光伏和电动汽车接入配电网的无功优化[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 31-37, 102.  
TONG Xi, HOU Langbo, SUN Hao, et al. Reactive power optimization of distribution networks with high proportion of PV and EVs[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 31-37, 102.
- [34] 张前进, 周林, 李海啸, 等. 考虑 SVG 补偿装置的大型光伏并网系统振荡分析与抑制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2636-2644.  
ZHANG Qianjin, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. Oscillation analysis and suppression of large-scale grid-connected photovoltaic system considering SVG equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2636-2644.
- [35] 李羽晨, 王冠中, 张静, 等. 考虑光伏无功补偿的多馈入直流受端电网强度分析[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(15): 28-35.  
LI Yuchen, WANG Guanzhong, ZHANG Jing, et al. Strength analysis of multi-infeed receiving-end DC power grid considering photovoltaic reactive power compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 28-35.
- [36] 高圣达. 高压直流馈入受端电网后电压稳定特性[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.  
GAO Shengda. The voltage stability characteristic of terminal power grid fed by HVDC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [37] 赵晋泉, 汤建军, 吴迪, 等. 直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 45-53.  
ZHAO Jinquan, TANG Jianjun, WU Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC infeed receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 45-53.
- [38] 李华取, 彭晓涛, 覃琴, 等. 基于多目标优化的电网直流承载规模评估方法[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3115-3125.  
LI Huaqu, PENG Xiaotao, QIN Qin, et al. Assessment of DC load-carrying capacity of power grid based on multiple-objective optimization[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3115-3125.
- [39] 边宏宇, 潘晓杰, 刘芳冰, 等. 多直流馈入背景下的河南电压稳定分析及改善措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 125-131.  
BIAN Hongyu, PAN Xiaojie, LIU Fangbing, et al. Study on voltage stability analysis and improvement measures for Henan province with a background of multiple DC feeding[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 125-131.
- [40] 苏家财, 吴龙, 孙金超, 等. 火电机组增加调相机功能之励磁设计探讨[J]. 机电信息, 2023(8): 4-8.
- [41] 孔宁. 退役火电机组作调相机运行的站点筛选及励磁控制研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.  
KONG Ning. Research on station selection and excitation control of retired thermal power units operate as synchronous condenser[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [42] 张立建, 阳虹, 陈学文. 新型燃气-蒸汽联合循环调峰/调相电站浅析[J]. 热力透平, 2018, 47(3): 186-190.

- ZHANG Lijian, YANG Hong, CHEN Xuewen. Analysis on a new type of gas-steam combined cycle power plant for peaking/synchronous condensing[J]. Thermal Turbine, 2018, 47(3): 186-190.
- [43] 蒋哲, 王安东, 田浩, 等. 基于新型电力系统的退役火电机组改调相机运行研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(2): 17-22.  
JIANG Zhe, WANG Andong, TIAN Hao, et al. Research on synchronous condenser reconstructed from retired thermal power unit in the new power system[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(2): 17-22.
- [44] FAIRLEY P. Old coal's new role[J]. IEEE Spectrum, 2015, 52(8): 16-17.
- [45] 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.
- [46] 唐卫平. 凤滩水电厂机组调相运行及系统无功平衡方案探讨[J]. 华中电力, 2002(2): 18-20.  
TANG Weiping. The analysis of units operation of adjusting PF in Fengtan Hydropower Station and discussion of reactive-power balance scheme for electric power system[J]. Central China Electric Power, 2002(2): 18-20.
- [47] 陈道君, 李理, 谢捷敏, 等. 黑麋峰机组调相运行对提升湖南电网暂态电压稳定水平的影响分析[J]. 湖南电力, 2021, 41(1): 98-102.  
CHEN Daojun, LI Li, XIE Jiemin, et al. Analysis of the influence of Heimifeng unit phase modulation operation on upgrading transient voltage stability level in Hunan power grid[J]. Hunan Electric Power, 2021, 41(1): 98-102.
- [48] ZHAO Z, CHEN D, LI H, et al. Performance analysis of pumped-storage plant from condenser mode to generating process[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101286.
- [49] DIRIK H, GEZEGİN C, DIRIK H S. Reactive power compensation with hybrid compensator combining a synchronous motor and switched capacitors[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109010.
- [50] VALENTÍN D, PRESAS A, VALERO C, et al. Synchronous condenser operation in Francis turbines: effects in the runner stress and machine vibration[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 890-900.
- [51] 程明, 田伟杰, 王伟, 等. 新型同步调相机的关键技术及研究进展[J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 2-9.  
CHENG Ming, TIAN Weijie, WANG Wei, et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 2-9.
- [52] 李志坚, 吴崇昊, 万洛飞, 等. 大型同步调相机的启机过程分析与启机保护实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 148-154.  
LI Zhijian, WU Chonghao, WAN Luofei, et al. Analysis of start-up process and implementation of start-up protection of a large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 148-154.
- [53] 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.
- [54] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE F. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1-2): 5-12.
- [55] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于电气距离的复杂电网关键节点识别[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 146-152.  
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Critical node identification for complex power grid based on electrical distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 146-152.
- [56] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.  
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [57] KESSEL P, GLAVITSCH H. Estimating the voltage stability of a power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(3): 346-354.
- [58] CHOWDHURY B H, TAYLOR C W. Voltage stability analysis: VQ power flow simulation versus dynamic simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1354-1359.

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-12-22

作者简介:

付红军(1968—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

孙冉(1979—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制; E-mail: sunran202301@163.com

王建波(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。

(编辑 魏小丽)