

高压直挂型调相机动态特性及励磁控制研究

杨蕊蔓, 肖士勇, 赵鑫宇

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:针对高比例新能源电力系统电压波动特性突出、动态稳定支撑不足及常规分布式调相机配置升压变压器并网导致响应滞后、功率损耗偏大等问题,依据高压电缆绕组电机结构特性,建立了15Mvar-35kV高压直挂型调相机及传统分布式调相机机网动态仿真模型,开展了电压突变动态工况模拟分析,同时对比两类分布式调相机的动态运行表现,深入剖析了高压直挂型调相机动态特性,揭示了无升压变压器结构的设计优越性,验证了其深度调相能力;针对励磁控制的性能需求,设计了PID、模糊PID、变论域模糊PID励磁控制策略并开展了性能测试。研究表明,高压直挂型调相机可快速提供动态无功支撑,变论域模糊PID控制可提升励磁响应速度并抑制超调,提升系统动态无功支撑与电压稳定能力。

关键词:高压直挂型调相机;动态特性;励磁控制;无功补偿;变论域模糊 PID;新能源场站

Research on Dynamic Characteristics and Excitation Control of High-Voltage Direct-Connected Synchronous Condenser

Yang Ruiman, Xiao Shiyong, Zhao Xinyu

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Aiming at prominent voltage fluctuation, insufficient dynamic stability support in power systems with high penetration of new energy, as well as delayed response and large power loss caused by step-up transformers equipped in conventional distributed synchronous condensers, dynamic simulation models of 15Mvar-35kV high-voltage direct-connected synchronous condenser and traditional distributed synchronous condenser are established based on structural characteristics of high-voltage cable winding motors. Dynamic simulation analysis under sudden voltage variation conditions is carried out, and dynamic operating performances of the two types of condensers are compared. The dynamic characteristics of high-voltage direct-connected synchronous condenser are thoroughly analyzed, the design merits of transformer-free structure are clarified, and its deep phase modulation capability is verified. In accordance with performance requirements of excitation control, PID, fuzzy PID and variable universe fuzzy PID excitation control strategies are designed and tested. The results show that high-voltage direct-connected synchronous condenser can supply dynamic reactive power support rapidly. Variable universe fuzzy PID control accelerates excitation response and restrains overshoot, effectively improving dynamic reactive power support and voltage stability of power systems.

Key words: high-voltage direct-connected synchronous condenser; transient characteristics; excitation control; reactive power compensation; variable universe fuzzy PID; new energy station

引言

为加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系,我国新能源装机容量持续稳步攀升,新型电力系统的无功支撑和电压稳定也同时面临着严峻考验^[1]。新能源场站等新能源高渗透并网区域,出力存在波动性和间歇性,要求电网运行状态更加稳定可靠。分布式调相机能够保障足额的动态无功功率输出,可缓解新能源场站无功支撑压力,优化电能质量,提高电压水平^[2],抑制电网电压波动。

新型分布式调相机有望成为新能源场站的标准配置设备^[3]。高压直挂型调相机作为新型分布式调相机,其结构上具有独特的设计优势,省去升压变压器直接并网,动态参数再度优化,增大系统短路容量,可实现抑制电网电压波动,加速电压回稳,保障系统持续稳定,增强对电网的动态支撑能力。造价偏高是制约分布式调相机普及应用的核心原因,而高压直挂型调相机省去升压变压器,直接并网至新能源场站35kV母线,减小了功率损耗,大幅提高经济效益,具有良好的发展前景与推广价值^[4]。高压直挂型调相机尚停留在理论研究阶段,缺乏工程实例验证。对其开展动态仿真及动态特性分析,将高压直挂型调相机技术从理论研究向工程应用推进,为新能源场站装设此分布式调相机提供理论支撑,具有重要理论价值和现实意义。

文献[5]通过分析不同电气指标对调相机动态及次动态性能的影响,总结出优化其动态性能的核心参数与改进方案,重点在于减小直轴次动态电抗 X_d'' 和主变短路电抗 X_k ,缩减直轴开路及短路时间常数 T_{d0}' 和 T_d' 。文献[6]研究了同步调相机在正常运行及不同故障工况下的无功响应特性。文献[7]对含分布式调相机的新能源系统发生短路故障和负荷突增工况进行研究,对比分析分布式调相机投入前后电网电压的变化情况,确定分布式调相机抑制新能源系统动态过电压的作用。文献[8]指出大容量集中式调相机难以抑制新能源动态过电压,开展分布式调相机对风机动态特性影响仿真实验,验证了分布式调相机能有效抑制新

能源侧动态过电压。文献[9]分析分布式调相机对高比例风电系统电压安全稳定影响,并对比得出分布式调相机无功响应灵敏度更高,可更有效地抑制高比例风电系统动态过电压现象的结论。文献[10]针对风场动态过电压这一突出问题,以新型分布式调相机作为无功补偿装置,并针对其无功补偿方面的局限性,对其励磁控制系统优化完善。文献[11]通过建立系统数学模型,分析了大规模新能源基地中分布式同步调相机的动态功角稳定特性。文献[12]指出电网发生故障时调相机易出现动态功角失稳问题,为此该文献依托系统电气量相量特性,构建了适用于分布式调相机的功角稳定分析方法,探究了故障全时段内设备动态运行特征及影响其功角稳定性的各类因素。文献[13]对计及阻尼绕组双馈调相机的电压跌落故障动态特性、频率扰动动态响应特性进行了分析。分析发现,还未有文献对高压直挂型调相机这一新型分布式调相机的动态特性进行分析。

可再生能源电站多布局于偏远地带,这就对调相机的无人值守运行能力提出了较高要求。因此,精准调控其动态无功与进相能力尤为关键^[14]。为满足该运行需求,亟须对调相机励磁控制系统进行优化,以达到在电力系统正常运行状态下平抑电压波动、平衡系统无功功率分配;在电力系统故障状态下,增强系统抗扰动能力,保障系统稳定性的效果。

本文通过搭建机网动态模型,对 15Mvar-35kV 高压直挂型调相机开展动态特性分析,同时对其励磁控制系统进行优化。基于 Matlab/Simulink 仿真平台,建立高压直挂型调相机及传统分布式调相机机网动态仿真模型,开展电压突变动态工况模拟分析,同时比对两类分布式调相机的动态运行表现;根据电网直连型调相机励磁系统的设计要求和工作特性,针对励磁系统的控制需求与现有控制方法的不足,本文设计了 PID、模糊 PID、变论域模糊 PID 三种励磁控制策略;最后,通过搭建仿真模型,仿真对比各类控制策略的有效性与优越性。

1 高压直挂型调相机动态仿真模型

高压直挂型调相机的定子侧采用交联聚乙烯电缆绕组和非磁性齿槽结构^[15]。电缆绕组由导体,内部半导体层,绝缘层,外部半导体层组成,没有常规电缆绕组中的金属壳或包皮,外部半导体层和地电势相连^[16]。这使得电场完全约束在电缆绕组内部,无需像传统电机一样控制末端绕组区的电场,解决了高压产生的电晕和放电问题^[17],可大幅度提高定子绕组的电压等级,实现调相机与电网的直连。省去调相机侧开关、母线和升压变压器,大幅减小了调相机与电网的联系电抗,同时避免了变压器的无功及有功消耗,可显著提高调相机的效率^[18]。超导励磁绕组和非磁性齿槽结构使其动态电抗较小,有效提升了调相机无功响应速度^[19]。

高压直挂型调相机无需借助升压变压器即可实现并网,基于这一结构特点,得到其动态仿真模型原理框图如图 1 所示。

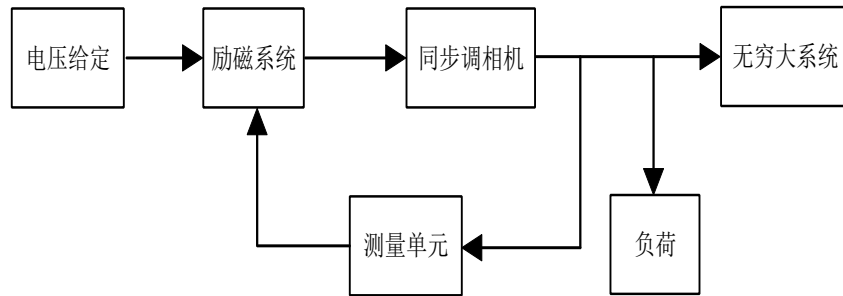


图 1 动态仿真模型原理框图

Fig. 1 Schematic of transient simulation model

高压直挂型调相机电机本体仍沿用同步电机核心结构,搭建动态仿真模型时,调用 Simulink 平台内置标准同步电机模块。传统调相机需依赖升压变压器并网,动态参数优化空间受限;高压直挂型调相机凭借其独特构造省去升压变压器,且提高了动态参数优化上限,高压直挂型调相机动态参数如表 1 所示。

结合现有工程实际,新能源场站机端母线电压多为 35kV^[20],该电压等级可与 15Mvar-35kV 高压直挂型

调相机相适配,满足直连并网条件。仿真将 35kV 的三相交流电压源作为理想电网模型,完成高压直挂型调相机动态仿真模型的搭建,仿真模型如图 2 所示。

表 1 高压直挂型调相机动态参数

Table 1 Dynamic parameters of high-voltage direct-connected synchronous condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/Mvar	15	额定电压/kV	35
$X_d/p.u.$	0.09	$X_q/p.u.$	0.09
$X_d'/p.u.$	0.0392	$X_q'/p.u.$	0.039
$X_d''/p.u.$	0.0235	$X_q''/p.u.$	0.0243
T_d/s	1.5	T_q/s	1.4144
T_d''/s	0.0993	T_q''/s	0.1768

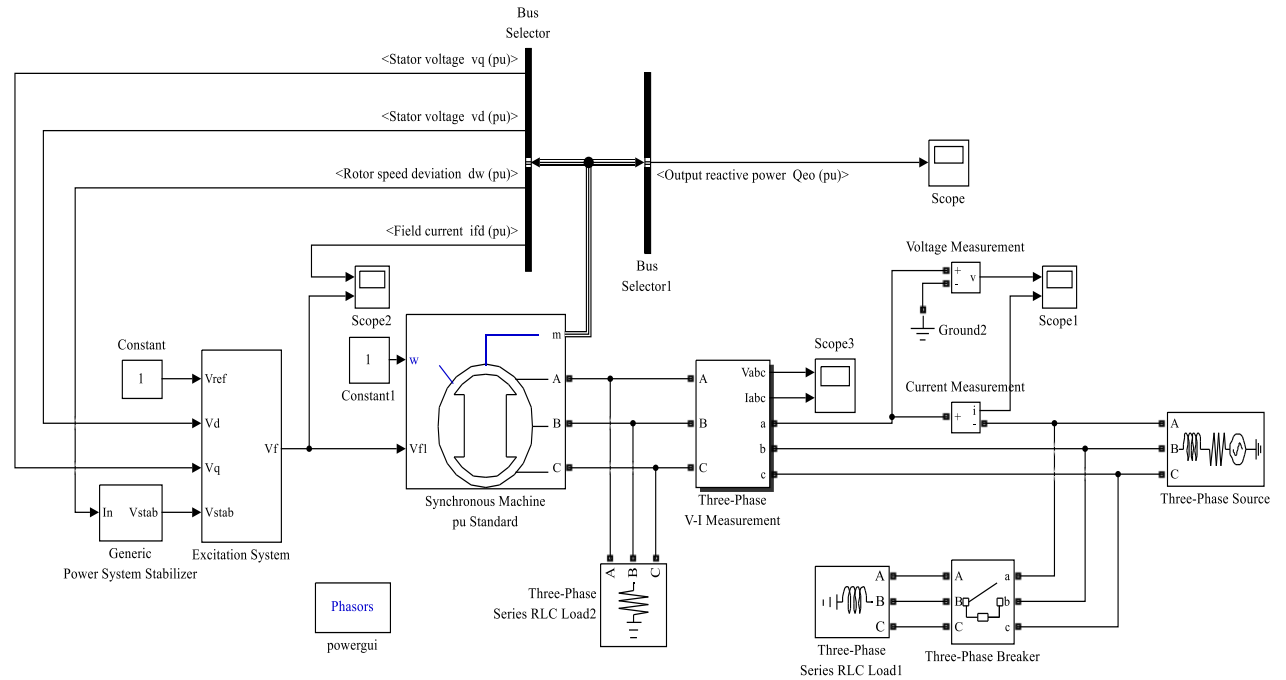


图 2 高压直挂型调相机动态仿真模型

Fig. 2 Dynamic simulation model of high-voltage direct-connected synchronous condenser

2 高压直挂型调相机动态特性分析

2.1 系统电压突变动态工况仿真

以电压跌落典型动态工况为例,设定整体仿真时长为 5s,在 1s 时施加系统电压突降扰动,使电压跌落至 0.76p.u.,仿真得到系统电压突变动态变化波形如图 3 所示。

当检测到机端电压骤降后,调相机自动励磁调节系统快速响应,设备立即进入强励运行状态。励磁电压在 0.016s 内迅速上升至额定励磁电压的 4.97 倍,过励工况下励磁电压输出波形如图 4 所示。

与此同时,高压直挂型调相机在 0.061s 内提供 2.3 倍额定励磁电流实现强励,过励工况下励磁电流输出波形如图 5 所示。

强励状态下励磁电压与励磁电流短时大幅提升,此时高压直挂型调相机瞬时无功功率出力为额定值的 5.28 倍,过励工况下无功功率输出波形如图 6 所示。

故障发生 0.1s 内,在强励投入下,系统电压迅速抬升;自故障发生起经过 0.2s 后,系统电压恢复至额定值,工况趋于平稳,如图 3 所示。此时高压直挂型调相机励磁电压、电流均下降至额定值的 1.6 倍,无功功率以 4.8 倍额定容量平稳输出,保障系统持续稳定运行。

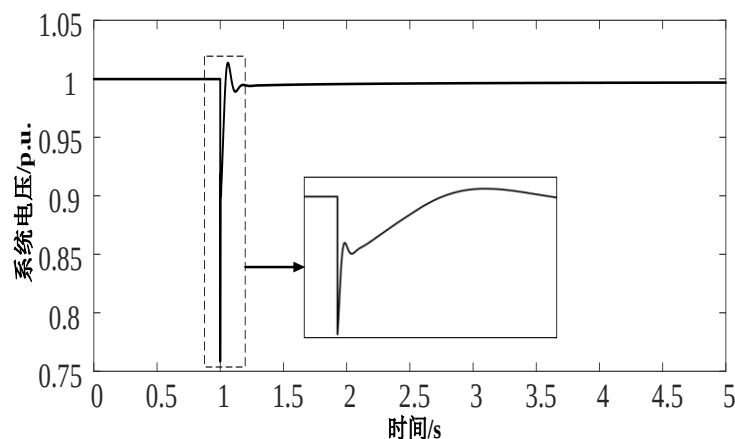


图3 系统电压回稳波形

Fig. 3 System voltage recovery waveform

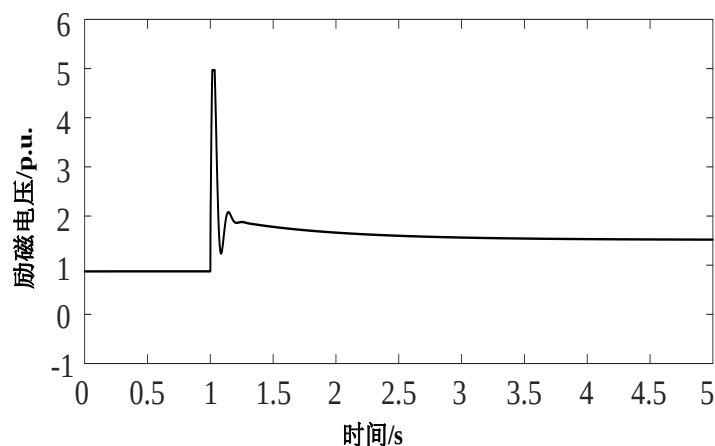


图4 过励工况下励磁电压响应波形

Fig. 4 Excitation voltage response waveform under overexcitation condition

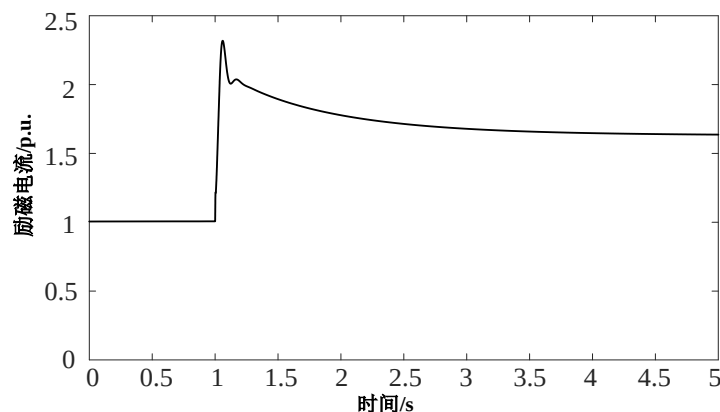


图5 过励工况下励磁电流响应波形

Fig. 5 Excitation current response waveform under overexcitation condition

2.2 高压直挂型调相机动态性能优势分析

研究选取 50Mvar-10.5kV 规格的传统分布式调相机作为参照对象,设备动态参数如表 2 所示。

传统分布式调相机需采用升压变压器接入 35kV 电压网络,据此搭建对应的并网动态仿真模型,如图 7 所示。开展仿真模拟,探究传统分布式调相机与高压直挂调相机的动态表现差异。

为开展特性对比分析,以电网电压跌落动态过程为测试工况,仿真方案配置同 2.1,设置仿真总运行时长

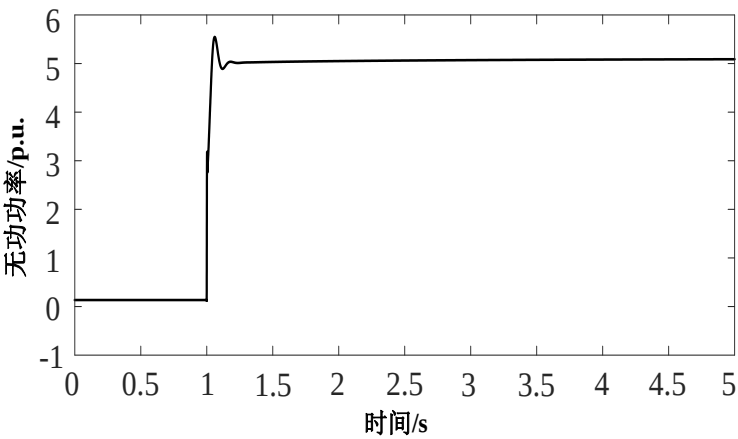


图6 过励工况下无功功率响应波形

Fig. 6 Reactive power response waveforms under overexcited operation

表2 传统分布式调相机动态参数

Table 2 Dynamic Parameters of Traditional Distributed Synchronous Condenser

参数	数值	参数	数值
额定容量/Mvar	50	额定电压/kV	10.5
$X_d'/p.u.$	0.89	$X_q'/p.u.$	0.882
$X_d/p.u.$	0.1077	$X_q/p.u.$	0.253
$X_d''/p.u.$	0.1066	$X_q''/p.u.$	0.095
T_d/s	6.7	T_q/s	0.753
T_d''/s	0.035	T_q''/s	0.093

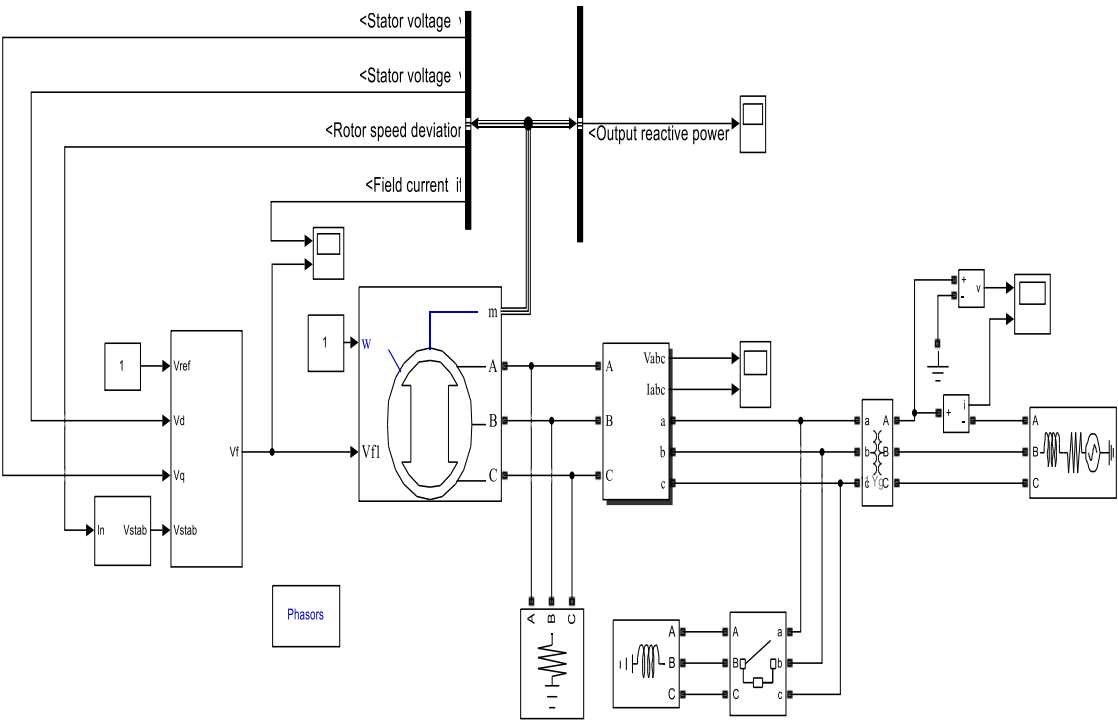


图7 传统分布式调相机动态仿真模型

Fig. 7 Dynamic Simulation Model of Traditional Distributed Synchronous Condenser

5s,当仿真运行至1s时,控制系统电压瞬时跌落至0.88p.u.。

如图8所示为在统一仿真设置条件下,分别装设两类分布式调相机的系统电压回稳波形。故障扰动出现后,配备传统分布式同步调相机的系统在0.04s内,可将跌落电压快速抬升至0.95p.u.,后续电压以平缓趋势逐步回升,最终在2.3s前后恢复至额定稳态运行工况;相比之下,高压直挂型调相机的短时深度调相优势突出,可驱动电网电压快速回稳,仅用时约0.2s即可回升至额定电压水平。

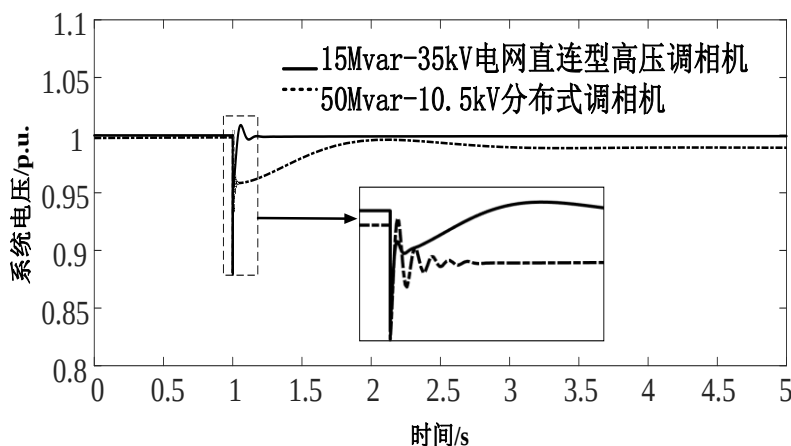


图8 配置不同分布式调相机的35kV系统电压回稳波形

Fig. 8 Voltage Recovery Waveforms of 35 kV System with Different Distributed Synchronous Condensers

图9为两类分布式调相机励磁电压响应对比波形。当系统故障扰动出现时,高压直挂型调相机即刻投入强行励磁,励磁电压瞬时攀升至额定值的2.9倍;待系统电压恢复稳态后,其励磁电压稳定保持在1.25倍额定水平。相较之下,传统分布式调相机故障瞬间,其励磁电压峰值可达额定励磁电压的9倍,系统工况平稳后,励磁电压则持续维持在1.84倍额定数值。

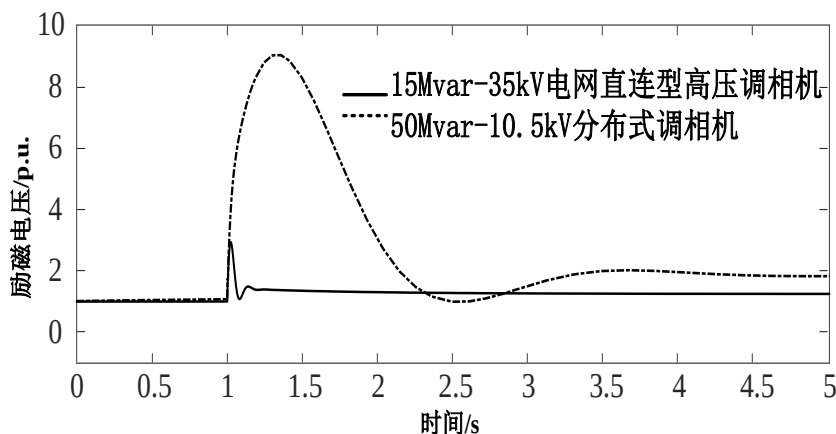


图9 两类分布式调相机对应的励磁电压响应波形

Fig. 9 Excitation voltage response waveforms corresponding to two types of distributed synchronous condensers

图10为两类分布式调相机励磁电流响应对比波形。当系统故障扰动出现时,高压直挂型调相机即刻投入强行励磁,励磁电流峰值为额定值的1.53倍;待系统电压恢复稳态后,励磁电流稳定在额定值的1.25倍。相较之下,传统分布式调相机故障瞬间,励磁电流可达额定值的1.8倍,系统运行平稳后,其励磁电流最终保持在1.59倍额定数值。

图11为两类分布式调相机无功功率响应对比波形。当系统故障扰动出现时,高压直挂型调相机即刻投入强行励磁,无功功率峰值输出为额定值的2.24倍;待系统电压恢复稳态后,无功功率稳定在额定值的2.1

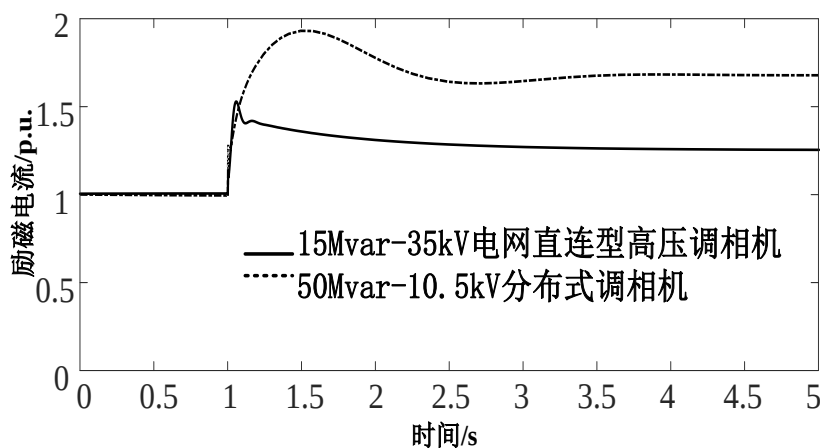


图 10 两类分布式调相机对应的励磁电流响应波形

Fig. 10 Excitation current response waveforms corresponding to two types of distributed synchronous condensers

倍。相较之下,传统分布式调相机故障瞬间,无功功率可达额定值的 0.76 倍,系统运行平稳后,无功功率最终保持在 0.74 倍额定数值。

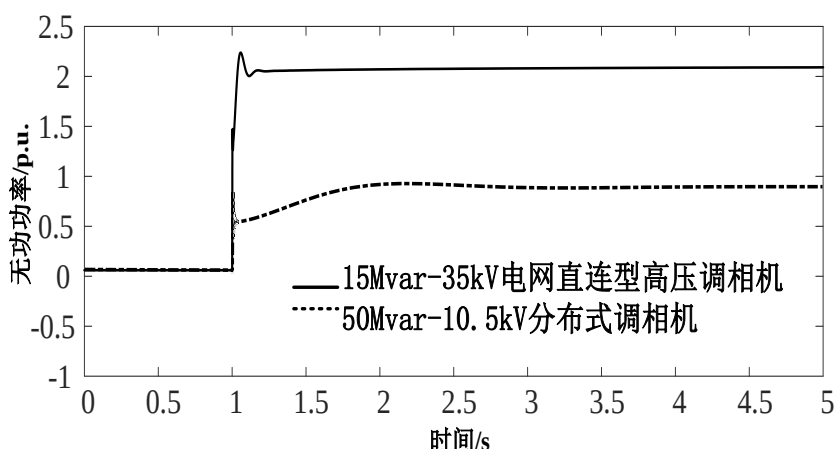


图 11 两类分布式调相机对应的无功功率响应波形

Fig. 11 Reactive Power Response Waveforms of Two Types of Distributed Synchronous Condensers

两类分布式调相机励磁电压、电流响应波形基本趋同。高压直挂型调相机凭借超导励磁绕组结构优势,以更小的励磁电压、电流波动幅值,更短的动态过程持续时间,在 0.2s 内输出峰值为额定值 2.24 倍的无功功率,借助短时间深度调相,有效加快系统电压的恢复速度,在系统电压支撑能力与动态响应速度上具有突出优势。相比之下,常规分布式调相机励磁电流峰值需达额定值的 1.8 倍,才能输出 0.76 倍额定无功功率,且响应缓慢。

3 高压直挂型调相机励磁控制系统优化

励磁控制系统是电力系统控制的核心环节,不仅需稳定机端电压、完成无功功率调节,还必须保障电力系统的动态稳定性。励磁系统性能对电机的运行水平起决定性作用,与电机运行可靠性、系统稳定性及供电质量等关键技术指标密切相关^[21-23]。本文前面两部分搭建了高压直挂型调相机动态仿真模型,并对其动态特性进行了多角度分析。仿真结果表明,在大扰动动态工况下,高压直挂型调相机能够实现短时强励,使系统电压回归稳定运行水平。但在励磁系统快速响应时,输出电压波形存在超调量较大,进入稳态缓慢等问题。本节采用 PID 控制、模糊 PID 控制和变论域模糊 PID 控制,对高压直挂型调相机励磁控制系统进行优

化。励磁系统依靠精准调节励磁机励磁电压,间接维持对机端电压的稳定控制。对励磁控制系统的优化,进一步提高了高压直挂型调相机动态性能。

3.1 PID控制

在本文PID控制策略的设计过程中,将励磁电压偏差作为控制策略的核心输入量,通过改变比例系数 K_p ,积分系数 K_i ,微分系数 K_d ,优化系统动静态特性,进而实现高压直挂型调相机机端电压的稳定控制。该控制方式适应性强,结构简单,在励磁控制领域应用普遍,其控制原理图如图12所示。

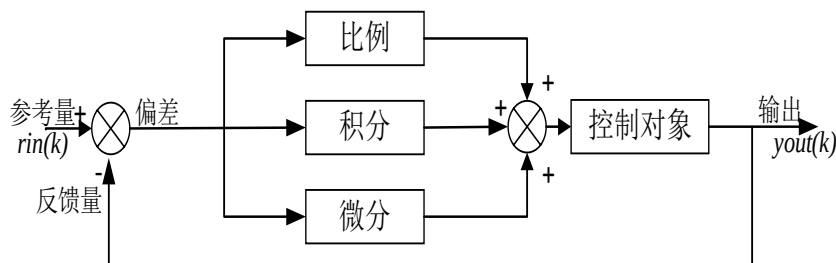


图12 PID控制原理框图

Fig. 12 Block Diagram of PID Control Principle

按其原理,搭建PID控制的仿真模型,如图13所示。

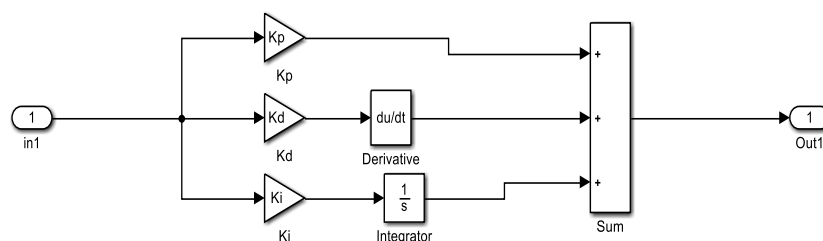


图13 PID仿真模型

Fig. 13 Conventional PID simulation model

设置参数为 $K_p=1.2$, $K_i=0.5$, $K_d=0.015$,以电压跌落动态工况仿真为例,运行效果如图14所示。

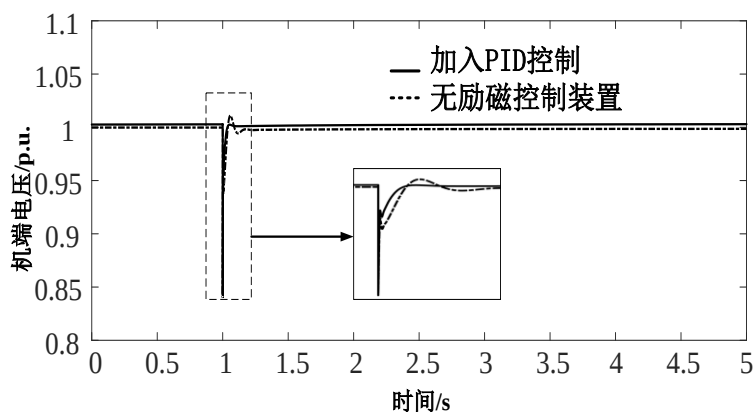


图14 加入PID控制器前后机端电压对比

Fig. 14 Comparison of terminal voltage before and after adding the PID controller

PID控制器的接入使得机端电压超调量由1.3%降低到0.14%,降低了90%,励磁反应更加迅速,进入稳态时间缩短了0.119s,进一步提高了高压直挂型调相机的性能,削弱了瞬时故障对电网的影响,进而提升电网稳定性。

现代电力系统呈现出高度非线性与时变特征,尽管PID控制架构简洁、工程实现便捷且具有一定的抗干

扰能力,可适配常规控制需求,但面对电力系统的复杂特性,仍需寻求更有效的控制方法^[24]。模糊控制适配复杂的非线性时变系统,自适应和抗干扰性能更优^[25]。依托模糊集合控制理论,可以实时在线修正PID参数,弥补常规PID参数固定无法动态调节的缺陷。

3.2 模糊PID控制

将模糊控制与常规PID控制策略相结合,形成的模糊PID励磁控制策略,兼具两类控制优势,既可提升系统响应速度,又可以强化控制系统运行的稳定性,保障控制精度^[26]。模糊PID控制器由模糊控制模块与常规PID调节器共同组成,其整体结构如图15所示。该控制器以励磁电压偏差值 e 和励磁电压偏差变化率 ec 作为模糊控制模块的输入量,输出参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,用以整定PID的三个核心参数 K_p 、 K_i 、 K_d 。

其工作流程为,首先对输入量 e 和 ec 做模糊化转换,将精确数值转换为模糊语言量;随后根据预设的模糊控制规则,开展模糊推理判定;最后经解模糊算法,将模糊推理结果换算为精确修正数值 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,完成PID参数的在线自适应调整。其中, G_e 和 G_{ec} 分别为输入量 e 和 ec 的量化因子。

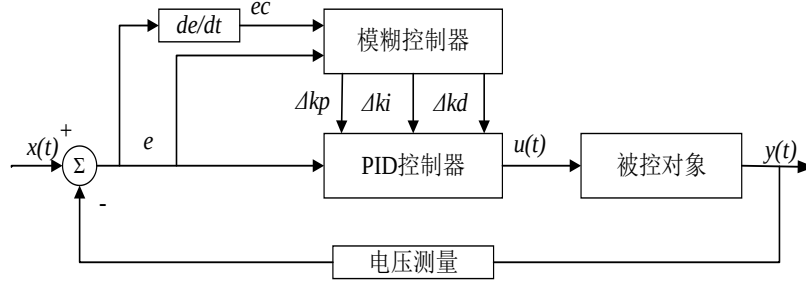


图15 模糊PID原理框图

Fig. 15 Principle block diagram of fuzzy PID

按其原理,搭建模糊PID控制的仿真模型,如图16所示。

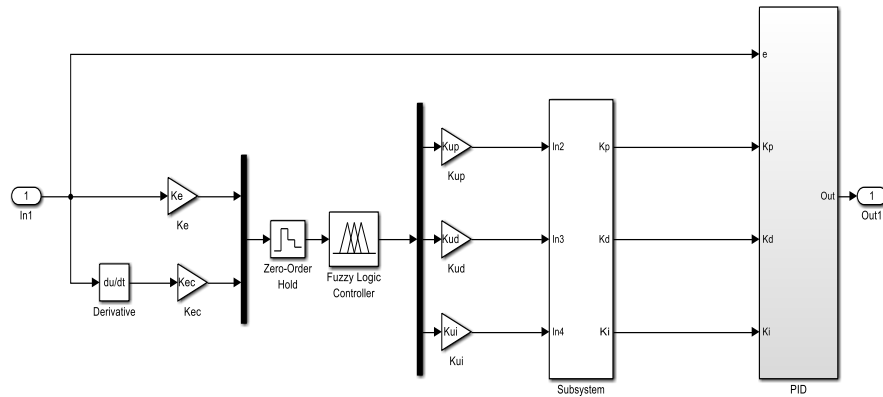


图16 模糊PID仿真模型

Fig. 16 Fuzzy PID simulation model

其中Subsystem和PID模块为封装模块,Fuzzy Logic Controller模糊控制规则查阅参考文献[23]可得。

设置参数为 $K_{p0}=1.5$ 、 $K_{d0}=0.015$ 、 $K_{i0}=0.5$ 、 $K_{up}=1$ 、 $K_{ud}=0.5$ 、 $K_{ui}=0.6$ 、 $K_{ec}=0.1$ 、 $K_e=0.2$,以电压跌落动态工况仿真为例,运行效果如图17所示。

模糊PID控制器的接入使得机端电压超调量由1.3%降低到0.3%,降低了77%,励磁反应更加迅速,进入稳态时间缩短了0.122s。与PID对比,其超调量略高于PID,这是其稳态电压偏低造成的,模糊PID机端电压峰值低于PID,进入稳态也更加迅速,对电网的冲击更小。

3.3 变论域模糊PID控制

变论域模糊算法由李洪兴教授首次提出^[27],该算法突破了传统模糊控制固定论域的局限,核心优势在于可根据系统误差的动态变化实时调整模糊论域范围。

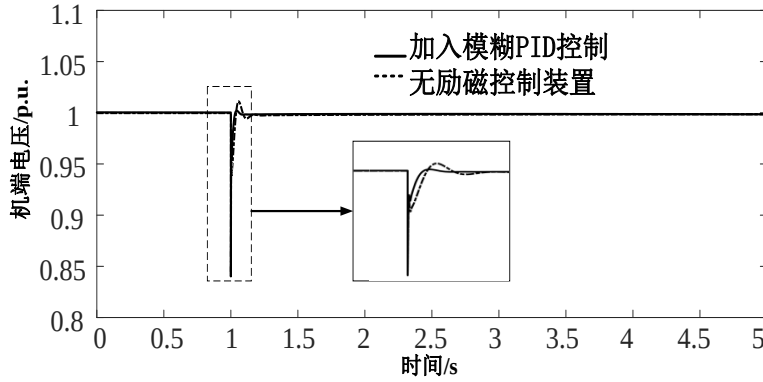


图 17 加入模糊PID控制器前后机端电压对比

Fig. 17 Comparison of terminal voltage before and after adopting the fuzzy PID controller

相较于传统模糊控制,变论域模糊控制无需依托大量专业领域经验,仅需明确基本的控制规则趋势即可完成设计。该算法对控制规则、隶属度函数及论域等分方式的适配性更强,降低了人为参数设定的主观性,不仅简化了控制器设计流程,还显著提升了系统控制精度^[28]。综上,变论域模糊控制作为一种高精度自适应模糊算法,能够有效处理控制对象存在的非线性、不确定性等技术难点^[29]。将变论域模糊控制与常规的PID控制策略相结合,形成变论域模糊PID策略。变论域模糊PID控制器实际上就是可依据系统误差动态调整模糊论域、实现PID参数的在线自适应优化的模糊PID控制器^[30],其原理框图如图18所示。

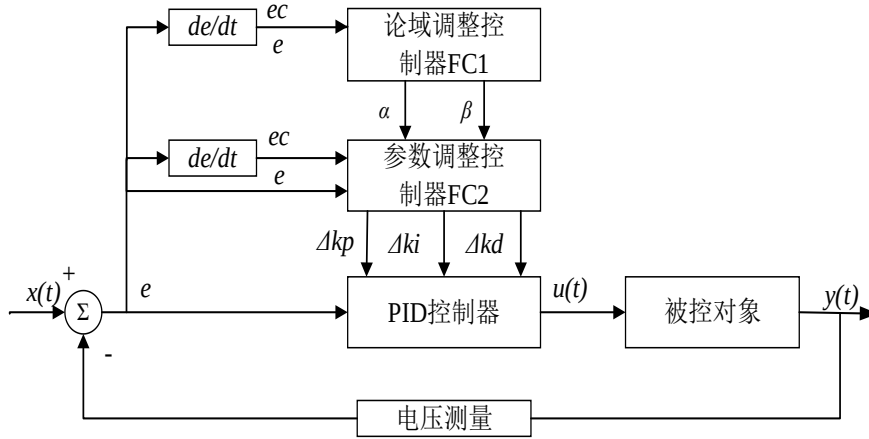


图 18 变论域模糊PID原理框图

Fig. 18 Principle Block Diagram of Variable Universe Fuzzy PID

按其原理,搭建变论域模糊PID控制的仿真模型,如图19所示。

Subsystem和PID模块内部结构同上文,VUFC模块为论域调整控制器。

Fuzzy Logic Controller1中输入的模糊控制规则查阅参考文献[23]可得。设置参数为 $K_{p0}=1.2$, $K_{d0}=0.015$, $K_{i0}=0.5$, $K_{up}=1$, $K_{ud}=0.5$, $K_{ui}=0.4$, $K_{ec}=0.2$, $K_e=0.1$,以电压跌落动态工况仿真为例,运行效果如图20所示。

变论域模糊PID控制器的接入使得机端电压超调量由1.3%降低到0.1%,降低了92.3%,励磁反应更加迅速,进入稳态时间缩短了0.133s。与PID相比,其超调量更低,进入稳态也更加迅速。表3为三种控制方式的数据对比。

通过对比四种控制装置可以看出,在变论域模糊PID控制下的励磁电压相对其他控制更加平滑,超调量降至0.1%,在多种励磁控制策略中控制效果最优。

4 结论

本文基于Matlab/Simulink仿真平台,通过搭建电网动态仿真模型,开展对15Mvar-35kV高压直挂型调

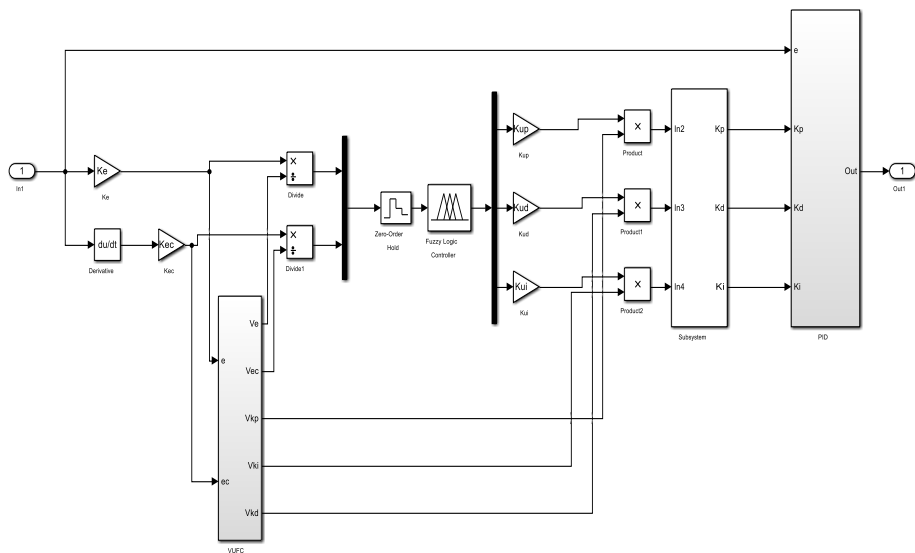


图 19 变论域模糊PID仿真模型

Fig. 19 Simulation Model of Variable Universe Fuzzy PID

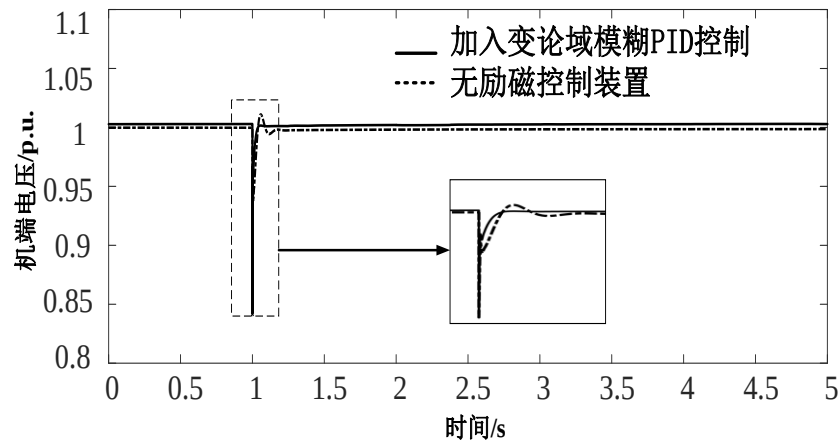


图 20 加入变论域模糊PID控制器前后机端电压对比

Fig. 20 Comparison of Terminal Voltage Before and After Adding Variable Universe Fuzzy PID Controller

表 3 三种控制方式数据对比

Table 3 Data Comparison of Three Control Methods

	超调量 $M_p/\%$	稳定时间 T_s/s	电压峰值 U_p/kV
无控制装置	1.3%	0.228	28.89
PID	0.14%	0.109	28.65
模糊PID	0.3%	0.106	28.64
变论域模糊PID	0.1%	0.095	28.62

相机的动态特性分析,并通过PID、模糊PID和变论域模糊PID控制策略,优化其励磁控制系统,得到以下结论:

1)高压直挂型调相机具备优异的动态电压支撑能力,电压跌落至0.76p.u.工况下能在0.2s内使系统电压恢复至额定值。其与常规分布式调相机相比电压恢复时间缩短91.3%,动态无功响应速度与电压稳定效果显著提升。

2)无升压变压器直连结构可消除变压器阻抗引起的无功损耗,降低励磁调节幅度,使其在相同故障工况下以更小的励磁电流与电压变化,实现的无功输出是常规分布式调相机 2.95 倍,无功补偿效率与动态性能优于常规分布式调相机。

3)变论域模糊 PID 控制可将机端电压超调量由 1.3% 降至 0.1%,稳定时间缩短至 0.095s,控制精度、响应速度与稳态平滑性均优于常规 PID 及模糊 PID 控制,可作为高压直挂型调相机励磁系统的优选控制策略。

参考文献:

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(08):2806-2819.
Zhang Zhigang, Kang Chongqing. Challenges and Prospects of Constructing New Power System Under Carbon Neutrality Goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(08): 2806-2819.
- [2] 杨佩佩,汤文,韩自奋,等. 新能源场站无功补偿装置投退对电网运行影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(06):10-16.
Yang Peipei, Tang Wen, Han Zifen, et al. Research on Influence of Switching Reactive Power Compensation Devices in New Energy Stations on Power Grid Operation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(06): 10-16.
- [3] 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. Review on Development of Synchronous Condensers[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6050-6064.
- [4] 申海鹏,郭超,金鑫,等. 高压直挂型调相机对新能源电网短路比和过电压的影响[J/OL]. 电网技术,1-8[2026-05-23].
Shen Haipeng, Guo Chao, Jin Xin, et al. Influence of High-voltage Direct-connected Synchronous Condensers on Short-circuit Ratio and Overvoltage of New Energy Power Grid[J/OL]. Power System Technology, 1-8[2026-05-23].
- [5] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术,2017,(04):15-22.
Li Zhiqiang, Jiang Weiyong, Wang Yanbin, et al. Key Technical Parameters and Optimal Design of Large-capacity New-type Synchronous Condensers[J]. Large Electric Machine Technology, 2017, (04): 15-22.
- [6] F. Dai, F. Tan, M. Jiang, X. Chen, H. Ma and M. Chen, "Characteristic Analysis and Parameter optimization of Synchronous Condensers," 2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, China, 2020.
- [7] 白聪. 分布式调相机参数辨识及其运行特性研究[D]. 哈尔滨理工大学,2023.
Bai Cong. Parameter Identification and Operation Characteristics Research of Distributed Synchronous Condensers[D]. Harbin University of Science and Technology, 2023.
- [8] R. Zhang, P. Wang, Y. Sun, X. Wang, Y. Yang and Y. Li, "Electromagnetic transient modeling and simulation of distributed synchronous condenser," 18th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2022), Online Conference, China, 2022.
- [9] 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(北京),2024.
Lin Yifan. Research on the Influence of Distributed Synchronous Condensers on Voltage Safety and Stability of High-proportion Wind Power Systems[D]. North China Electric Power University (Beijing), 2024.
- [10] 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 Qi. Research on Reactive Power Characteristics and Coordinated Control Strategy of New Distributed Synchronous Condensers[D]. Xinjiang University, 2023.
- [11] L. Wang, D. Shen and B. Lu, "Transient Power Angle Characteristics Analysis of Phase-shifting Camera Based on Large-scale New Energy Base," 2025 5th International Conference on Electrical Engineering and Mechatronics Technology (ICEEMT), Shenzhen, China, 2025.
- [12] 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,2024,40(1): 36-51.
Wang Tong, Wang Xiaotong, Han Zichang, et al. Analysis on Transient Characteristics and Mechanism of Transient Power Angle Stability of Distributed Synchronous Condensers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 36-51.

- [13] 高光远. 计及阻尼绕组的双馈调相机动态特性分析[D]. 华北电力大学, 2025.
Gao Guangyuan. Analysis on Dynamic Characteristics of Doubly-fed Synchronous Condenser Considering Damper Windings [D]. North China Electric Power University, 2025.
- [14] 宋林泉, 吴彩霞, 孙德锋. 分布式调相机的研究进展与发展现状[J]. 科技与创新, 2025, (11): 194-197.
Song Linqun, Wu Caixia, Sun Defeng. Research Progress and Development Status of Distributed Synchronous Condensers [J]. Science and Technology & Innovation, 2025, (11): 194-197.
- [15] 戈宝军, 王晓文, 陶大军, 等. 能量变换器样机的研制[J]. 电机与控制学报, 2008, (04): 370-373+379.
Ge Baojun, Wang Xiaowen, Tao Dajun, et al. Development of Prototype of Energy Converter[J]. Electric Machines and Control, 2008, (04): 370-373+379.
- [16] 戈宝军, 梁艳萍, 周垂有, 等. Powerformer——21 世纪新兴的发电装置[J]. 电力系统自动化, 2004, (07): 1-3+15.
Ge Baojun, Liang Yanping, Zhou Chuiyou, et al. Powerformer — An Emerging Power Generation Device in the 21st Century[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, (07): 1-3+15.
- [17] 戈宝军, 张大魁, 梁艳萍. 能量变换器及其最新发展[J]. 电工技术学报, 2005, (01): 26-30.
Ge Baojun, Zhang Dakui, Liang Yanping. Energy Converter and Its Latest Development[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, (01): 26-30.
- [18] 肖士勇, 张家乐, 戈宝军, 等. 超导超高压同步调相机多工况下定子电磁力计算及强度分析[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 34-45.
Xiao Shiyong, Zhang Jiale, Ge Baojun, et al. Calculation of Stator Electromagnetic Force and Strength Analysis of Superconducting Extra-high Voltage Synchronous Condenser under Multiple Operating Conditions[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 34-45.
- [19] 肖士勇, 郑重, 戈宝军, 等. 超导超高压同步调相机的电磁特性分析及参数计算[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2025, 30(06): 88-101.
Xiao Shiyong, Zheng Zhong, Ge Baojun, et al. Electromagnetic Characteristic Analysis and Parameter Calculation of Superconducting Extra-high Voltage Synchronous Condenser[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2025, 30(06): 88-101.
- [20] 徐珊珊, 刘峰, 杨帆, 等. 分布式调相机在新能源场站端的应用[J]. 电力勘测设计, 2024, (S1): 25-31.
Xu Shanshan, Liu Feng, Yang Fan, et al. Application of Distributed Synchronous Condensers at New Energy Station Side [J]. Electric Power Survey & Design, 2024, (S1): 25-31.
- [21] 吴斌. 同步发电机励磁控制系统的仿真研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 27-36.
Wu Bin. Simulation Research on Excitation Control System of Synchronous Generator[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 27-36.
- [22] 孙卓. 高温超导电机励磁系统设计研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2015.
Sun Zhuo. Research on Design of Excitation System for High-temperature Superconducting Motor[D]. Harbin Engineering University, 2015.
- [23] 刘科亮. 同步发电机自动励磁控制装置设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2022: 19-52.
Liu Kelian. Design of Automatic Excitation Control Device for Synchronous Generator[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022: 19-52.
- [24] 张兰勇, 孟坤, 朱帅. 高温超导发电机励磁系统变论域模糊控制[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(03): 109-115.
Zhang Lanyong, Meng Kun, Zhu Shuai. Variable Universe Fuzzy Control for Excitation System of High-temperature Superconducting Generator[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(03): 109-115.
- [25] 李楠, 孟庆春, 付晓峰. 基于参数自整定模糊 PID 控制策略的电机模型仿真研究[J]. 机电工程技术, 2004, (09): 55-57+95.
Li Nan, Meng Qingchun, Fu Xiaofeng. Simulation Research on Motor Model Based on Parameter Self-tuning Fuzzy PID Control Strategy[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2004, (09): 55-57+95.
- [26] 应黎明, 陈允平, 陈明榜. 异步化同步发电机转子励磁的模糊 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, (17): 163-168.
Ying Liming, Chen Yunping, Chen Mingbang. Fuzzy PID Control for Rotor Excitation of Asynchronized Synchronous Generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, (17): 163-168.
- [27] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 1999, (01): 32-42.

- Li Hongxing. Variable Universe Adaptive Fuzzy Controller[J]. Science China Information Sciences, 1999, (01): 32-42.
- [28] 于文俊. 变论域模糊控制算法在电力系统中的应用[D]. 华南理工大学, 2011.
- Yu Wenjun. Application of Variable Universe Fuzzy Control Algorithm in Power System[D]. South China University of Technology, 2011.
- [29] 付伟涛. 变论域模糊控制在直线电机控制系统中的应用研究[D]. 电子科技大学, 2014.
- Fu Weitao. Research on Application of Variable Universe Fuzzy Control in Linear Motor Control System[D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [30] 揭海宝, 康积涛, 李平. 基于变论域模糊PID控制的同步发电机励磁研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(06): 101-104.
- Jie Haibao, Kang Jitao, Li Ping. Research on Excitation of Synchronous Generator Based on Variable Universe Fuzzy PID Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(06): 101-104.