

文章编号:1671-6833(2026)05-0035-08

基于灰色预测 PI 的 HVDC 受端系统调相机励磁控制策略

王明东¹, 李冲冲¹, 梁姣姣², 李忠文¹

(1. 郑州大学 电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河水利水电开发集团有限公司, 河南 郑州 450004)

摘要:针对大容量同步调相机接入高压直流输电(HVDC)受端系统后,常规PI励磁控制在故障恢复阶段易出现母线电压超调及振荡的问题,提出一种基于灰色预测模型GM(1,1)的同步调相机PI励磁控制策略。该策略通过对受端母线电压序列进行灰色建模与趋势预测,提前获取电压偏差预测值,并将其作为PI控制器的输入,实现对励磁电压的前瞻性调节。基于CIGRE标准测试系统,构建了PSCAD/EMTDC与MATLAB/Simulink联合仿真平台,在多种典型扰动工况下,对比分析了灰色预测PI控制与常规PI控制的动态响应特性。仿真结果表明:所提控制策略能够有效补偿励磁系统的大惯性滞后,显著抑制母线电压超调并缩短系统调节时间;在三相短路故障下,母线电压最低值提高约4.5 kV,直流输送功率最低值提升约31 MW,系统恢复时间明显缩短。该策略兼具计算量低与实时性强等特点,可为HVDC受端系统同步调相机励磁控制优化提供有效技术途径。

关键词:同步调相机; 高压直流输电; 励磁控制; PI; 灰色预测

中图分类号:TM342;TP273

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2026.05.006

近年来,中国高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)工程规模持续扩大,直流馈入容量同步攀升,导致输电系统“强直弱交”特征愈发突出,引发了一系列运行稳定性问题,给受端电网的抗干扰能力带来了更大挑战。由于常规机组被HVDC大范围替代,加之无功负载增长及换流站自身的无功消耗^[1],系统动态无功储备被削弱,易导致电压失稳甚至多回路换相失败^[2]。在多馈入直流系统中,发生多回路换相失败,可能导致电网“解列”^[3-4]。因此,维持充足的动态无功储备对受端电网稳定运行至关重要^[5]。

目前,常用的动态无功调节设备包括同步调相机、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)及静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)^[6-7]。STATCOM和SVC的无功输出受接入点电压影响较大,且受限于过电流能力^[8]。相比之下,同步调相机在母线电压较低时仍能及时输出大量无功^[9-10],具备瞬时无功支撑能力和提供转动惯量能力^[11-13],能显著提升系统频率稳定性且谐波问题较少^[14]。因此,同步调相机的特性与

HVDC受端系统的无功需求更为契合。

调相机的无功输出能力由其本体参数和励磁控制系统共同决定^[15]。在调相机本体参数确定的前提下,优化励磁控制策略是提升其性能的关键^[16]。比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)及其简化形式PI控制因其结构简单、可靠性高且易于实现,在工业控制领域得到了广泛应用。常规PID控制在标准工况下表现稳定,但在面对具有未知扰动、大惯性及强非线性复杂系统时,其调节精度与鲁棒性往往难以兼顾^[17]。针对常规PI控制在复杂工况下参数固化、自适应性差的问题,现有研究提出了多种改进方案。例如,模糊PI控制通过规则库实现参数动态整定,但在缺乏先验经验时规则构建较为主观^[18]。变论域模糊PI控制虽扩大了调节范围,但显著增加了计算负担^[19]。而基于神经网络或启发式算法优化的PI控制器虽具备强非线性拟合能力,但其迭代计算过程往往难以满足调相机在毫秒级暂态过程中的实时响应需求^[20]。

考虑到上述算法的局限性,灰色预测控制对“小样本、信息不完全”系统具有独特的建模优势,

收稿日期:2026-05-11;修订日期:2026-07-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62273312);河南省自然科学基金资助项目(212300410406)

作者简介:王明东(1971—),男,河南濮阳人,郑州大学教授,博士,主要从事新型电力系统分析与控制方面的研究, E-mail: d894@163.com。

引用本文:王明东,李冲冲,梁姣姣,等. 基于灰色预测PI的HVDC受端系统调相机励磁控制策略[J]. 郑州大学学报(工学版), 2026, 47(5): 35-42. [Wang Mingdong, Li Chongchong, Liang Jiaojiao, et al. Excitation control strategy of synchronous condenser based on grey prediction PI for HVDC receiving-end system[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(5): 35-42.]

仅需少量历史数据即可预测系统行为,且计算维度低,具备极佳的实时性^[21]。本文选取接入 CIGRE 标准测试系统的调相机励磁系统为对象,针对常规 PI 控制存在的超调现象,将灰色预测与 PI 控制相结合,设计了灰色预测 PI 励磁控制系统。通过在交直流短路及无功负荷突增等工况下的仿真对比,验证了该策略在抑制超调、加快响应速度及提升系统稳定性方面的优越性能。

1 含同步调相机的 HVDC 系统仿真模型及参数

1.1 HVDC 系统模型

HVDC 系统采用单极中性点直接接地方式,遵循 CIGRE 标准,模型如图 1 所示。整流侧与逆变侧均采用 12 脉动换流单元,且两侧换流站配置的滤波器组可提供相应的无功支撑。送受端电网均为弱交流系统(短路比 SCR 均为 2.5),调相机接入受端弱交流母线侧。

1.2 调相机励磁控制及模型参数

1.2.1 调相机的励磁控制

在大型同步调相机励磁系统中,常规 PID 控制

器中的微分环节 D 虽具备一定的超前预测能力,但其本质是基于瞬时变化率的线性外推,对电网故障期间的高频谐波与电磁噪声极度敏感,极易诱发励磁电压的频繁波动^[22]。相比之下,本文通过引入的灰色预测控制对电压演化趋势进行 GM(1,1)建模,是一种非线性的“预演控制”范式。它通过累加生成弱化随机性,可在不放大噪声的前提下实现比线性微分更精准的前瞻补偿。因此,本文在设计初期就针对性地取消了微分环节,将对比重点置于工程中应用更广泛的常规 PI 控制,以验证灰色预测策略在解决超调与滞后问题上的实际增益。

本文中同步调相机采用静止自并励励磁结构,通过升压变压器接入逆变侧换流母线,其逆变侧详细仿真模型如图 2 所示。同步调相机的励磁控制框图如图 3 所示。励磁控制回路以换流母线电压偏差($U_{\text{sys}}-U_{\text{ref}}$)为驱动源,通过 PI 算法整定及后续的信号调理(放大环节③和整流环节④),实现对调相机励磁电压 E_f 的动态控制。图 3 中①为测量环节,可实时测量逆变侧母线电压,②为 PI 控制环节。

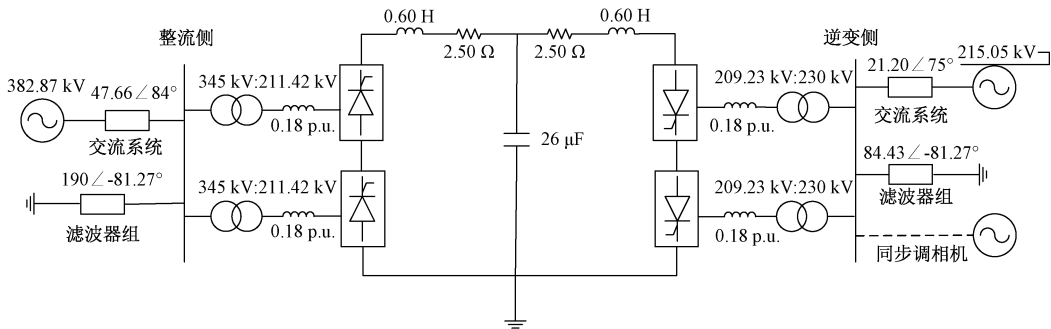


图 1 同步调相机接入 HVDC 受端系统的主电路

Figure 1 The main circuit of the HVDC receiver system with a synchronous condenser

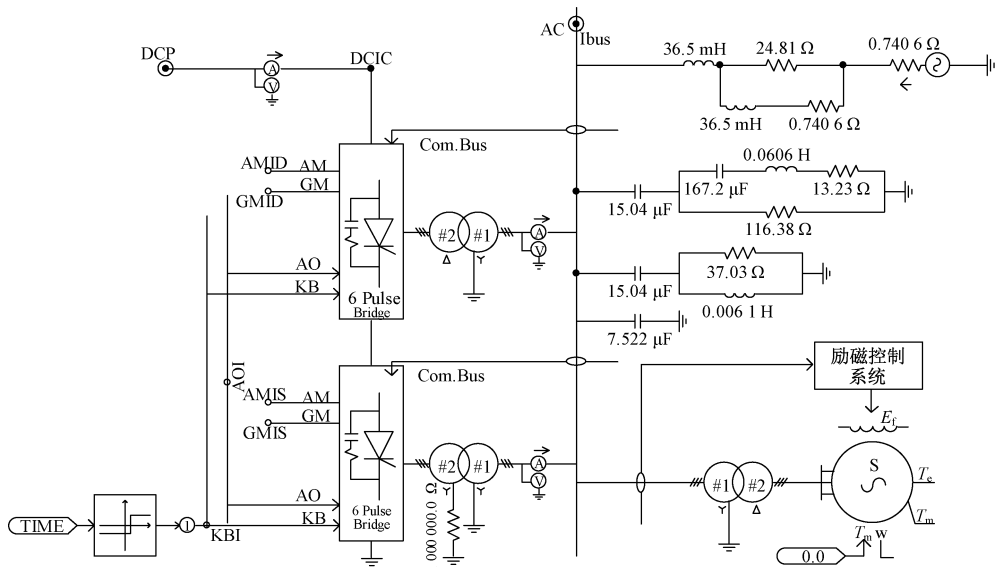


图 2 逆变侧详细仿真模型

Figure 2 Detailed simulation model of the inverter side

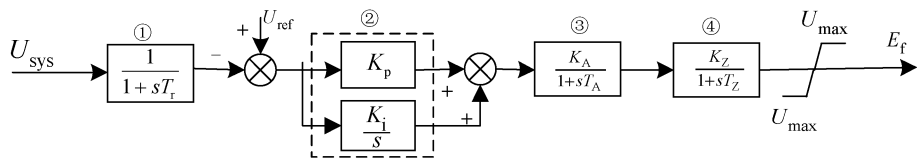


图 3 同步调相机的励磁控制框图

Figure 3 Excitation control block diagram of a synchronous condenser

1.2.2 调相机的模型参数设置

本文所涉及的同步调相机关键仿真励磁参数已在表 1 中列出。其中,PI 控制参数选取为 $K_p=1.2$, $K_i=0.2$,该组参数是基于准稳态工况下的 CIGRE 标准模型,采用临界比例度法进行初步整定,并结合系统动态响应特性经手动微调获得的平衡点,能够兼顾系统运行的稳定性和快速性。

表 1 调相机仿真参数

名称	数值/标么值
额定电压/kV	20
额定容量/Mvar	300
直轴同步电抗 $X_d/\%$	1.53
交轴同步电抗 $X_q/\%$	1.48
直轴暂态电抗 $X'_d/\%$	0.166
交轴暂态电抗 $X'_q/\%$	0.317
直轴次暂态电抗 $X''_d/\%$	0.112
交轴次暂态电抗 $X''_q/\%$	0.12
直轴开路暂态时间常数 T'_{do}/s	7.6
交轴开路暂态时间常数 T'_{qo}/s	0.829
直轴开路次暂态时间常数 T''_{do}/s	0.05
交轴开路次暂态时间常数 T''_{qo}/s	0.097
整流放大倍数 $K_Z/p.u.$	1.0
整流时间常数 T_Z/ms	1.67
积分系数 $K_i/p.u.$	0.2
比例系数 $K_p/p.u.$	1.2

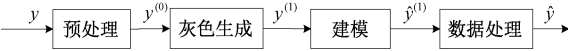


图 4 灰色预测控制基本过程

Figure 4 Basic process of grey predictive control

GM(1,1)来处理 $y^{(1)}$,得到预测结果 $\hat{y}^{(1)}$,最后通过反变换步骤,将 $\hat{y}^{(1)}$ 转换为原始数据的预测值 $\hat{y}$ 。

2.2 调相机灰色预测 PI 控制

当系统发生暂态故障时,常规 PI 控制下的同步调相机由于依赖“事后误差”进行反馈调节,难以克服励磁回路大惯性引起的响应滞后,致使恢复阶段的电气参数出现明显的超调与振荡。针对这一缺陷,本文将具有前瞻性的灰色预测理论集成至励磁控制系统中。灰色预测 PI 控制的核心在于将反馈逻辑从“被动响应”转为“主动预判”。通过构建 GM(1,1)模型,实时提取受端母线电压 U_{sys} 的演变趋势并生成预测序列。这种前瞻性的控制输入有效抵消了电机绕组电感及励磁系统时间常数带来的相位滞后,从机理上抑制了恢复过程中的超调现象,提升了系统的动态特性。其控制原理框图如图 5 所示,通过灰色预测环节提前获得偏差值,PI 控制器基于偏差值对系统进行预先控制。灰色预测模块与 PI 控制器的协同作用,可提升同步调相机的动态响应能力。

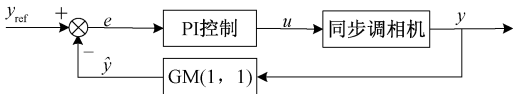


图 5 灰色预测 PI 控制原理框图

Figure 5 Block diagram of grey predictive PI control

2 同步调相机灰色预测 PI 励磁控制

2.1 灰色预测控制相关原理

灰色预测控制旨在探寻灰色系统的演化规律,通过灰色建模技术对有限且不完全的数据信息进行分析处理,实现对系统未来行为的有效估计。该控制方式本质上属于具有前瞻性的预测控制方法,其控制器输入并非仅依赖当前的实测反馈值,而是基于系统行为的预测值进行调节。这种超前调节机制能够补偿励磁系统的大惯性滞后,从而显著提升动态控制效率。灰色预测控制的基本过程见图 4。

首先原始数据 y 经过预处理步骤后,会转化为非负的序列 $y^{(0)}$,随后在灰色生成阶段,将 $y^{(0)}$ 转化为具有较强规律性的序列 $y^{(1)}$,再利用灰色模型

2.3 控制系统仿真模型

构建 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台。借助 PSCAD/EMTDC 在电磁暂态模拟方面的高保真度,可以精准模拟同步调相机并网 HVDC 系统后的实际运行状况。而 MATLAB/Simulink 在处理复杂控制算法与函数计算方面具有显著优势,可弥补 PSCAD 在励磁控制多样性建模上的不足。通过接口技术将二者结合,可兼顾物理系统精度与算法实现能力,PSCAD 与 Simulink 接口示意图如图 6 所示。利用 DSDYN 接口作为 PSCAD/EMTDC 与外部环境的交互媒介,通过编译 Fortran 代码

段激活 MATLAB 数据引擎,实现跨平台的数据调用。仿真过程中,PSCAD 将实时采样数据传输至 Simulink 环境,经灰色预测模型计算生成励磁控制量并即时返回,从而实现跨平台的闭环控制。

图 7 为同步调相机灰色预测 PI 控制仿真模型。系统母线电压 U_{sys} 在 PSCAD 中实时测量后,经由仿真接口传输至 MATLAB/Simulink 环境下的灰色预测控制模块。在该模块内部, U_{sys} 历经图 4 的 4 个步骤转化为预测电压信号。随后,该预测值被实时传回 PSCAD 环境,与给定参考电压 U_{ref} 进行比对得出偏差量。该偏差量作为 PI 控制器的输入,经调节

后生成励磁输出电压 E_f ,从而完成同步调相机的闭环预测控制过程。

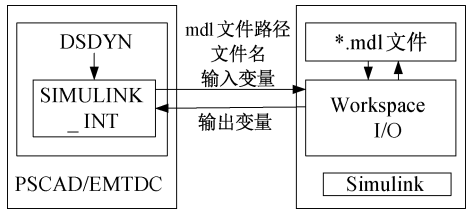


图 6 PSCAD 与 Simulink 接口示意图
Figure 6 Schematic diagram of the interface between PSCAD and Simulink

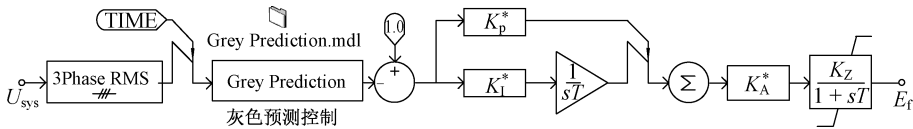


图 7 同步调相机灰色预测 PI 控制仿真模型
Figure 7 Grey predictive PI control simulation model of synchronous condenser

3 仿真结果及分析

为验证所提灰色预测 PI 控制策略在不同扰动下的动态性能,设置多种典型故障工况进行仿真分析,对比分析灰色预测 PI 与常规 PI 控制策略在故障工况下的电气量响应差异。

3.1 交流短路故障

设置系统在稳态运行至 3 s 时突发交流短路故障,持续时间 0.1 s,接地电阻为 120 Ω。

3.1.1 单相接地短路故障

单相接地短路故障下,各关键电气量的动态响应波形对比如图 8 所示。

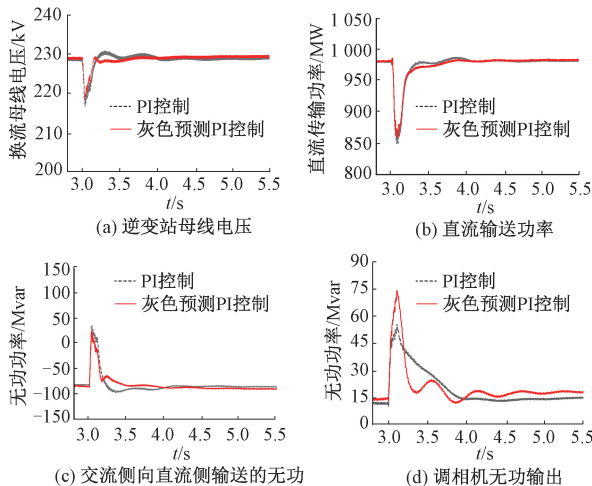


图 8 4 种电气量变化波形(单相接地短路故障)
Figure 8 Waveform of change in four electrical quantities (single-phase short-circuit fault to ground)

由图 8(a)与图 8(b)可知,在动态响应速度方面,灰色预测 PI 控制下的系统较常规 PI 控制提前 0.05 s 达到稳态值,调节时间由 4.2 s 缩短至 3.4 s,展现出更强的衰减特性。在暂态稳定性方面,采用灰色预测 PI 控制策略后,逆变侧母线电压跌落极值由 216.5 kV 提升至 218.2 kV,直流输送功率极值由 851 MW 提升至 862 MW,有效缓解了暂态过程中的功率波动;同时,母线电压超调量得到显著抑制。

由图 8(c)可知,灰色预测 PI 控制使交直流侧无功交换峰值降低了 13 Mvar,这种无功流动的减小直接削弱了对母线电压的扰动,增强了电压稳定性。由图 8(d)可知,采用灰色预测 PI 控制策略的调相机能够为系统提供更强的无功功率支撑,无功输出峰值较常规 PI 控制的调相机提升了约 20 Mvar。在保障故障瞬间电压支撑的同时,抑制了由常规 PI 控制输出滞后引起的母线电压超调现象。

3.1.2 三相短路故障

三相接地短路故障下,各关键电气量的动态响应波形对比如图 9 所示。

由图 9(a)与图 9(b)可知,在三相接地短路这一更为严重的故障工况下,灰色预测 PI 控制表现出比常规 PI 控制更优异的暂态支撑能力与恢复特性。从母线电压跌落极值看,采用灰色预测 PI 控制的系统逆变侧母线电压跌落极值为 206.5 kV,采用常规 PI 控制的系统母线电压跌落极值为 202 kV,前者较后者提高了 4.5 kV;从直流输送的功率看,直流线路输送功率最小值由 652 MW 提升至 683 MW,提高了 31 MW。由图 9(c)可知,采用灰色预测 PI 控制策略

后,交直流之间无功功率流动的峰值从 145 Mvar 降为 126 Mvar,交直流系统间无功交换的减少,显著抑制了母线电压的波动。从图 9(d)可以看出,故障发生瞬间,采用灰色预测 PI 控制策略的调相机能够提供更强的无功支撑,助力系统电压快速恢复。

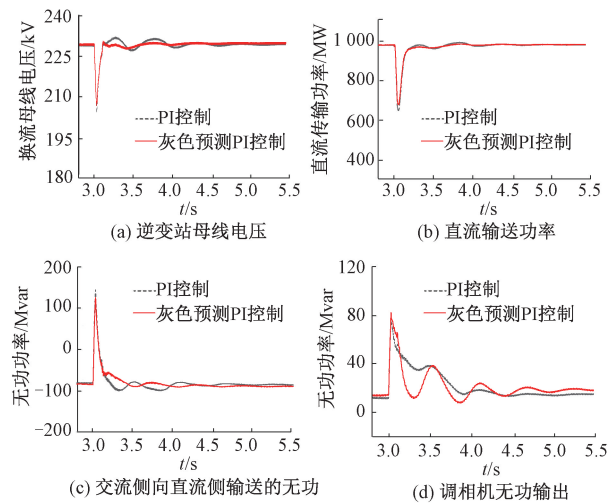


图 9 4 种电气量变化波形 (三相接地短路故障)

Figure 9 Waveform of change in four electrical quantities (three-phase short-circuit fault to ground)

对比单相故障与三相故障可知,后者虽严重程度更高,但灰色预测 PI 控制对母线电压和直流功率极值的提升幅度反而更大。这一现象揭示了该控制策略的非线性自适应优势。随着故障严重程度增加,电压跌落的非线性特征愈发显著,GM(1,1)模型捕捉趋势的优势得以充分体现,从而能提供更强的前瞻性补偿。此外,调相机通过灰色预测 PI 控制实现无功功率的快速调节,有效抵消了交直流系统间的无功冲击,缓解了恢复过程中的电气量振荡。

3.2 直流短路故障

为进一步验证所提控制策略在直流侧扰动下的稳健性,设置系统在稳态运行至 3 s 时发生直流短路故障,接地电阻与故障持续时间均与前述交流短路工况保持一致。图 10 展示了两种控制方式下,4 种关键电气量的动态响应波形对比。由图 10 可知,在直流线路短路故障瞬间,灰色预测 PI 控制对逆变侧母线电压、无功流动及直流传输功率极值的提升作用相对有限,其暂态极值与常规 PI 控制基本持平。但在故障切除后的动态恢复过程中,灰色预测 PI 控制展现出较好的调节性能。

在恢复第一阶段(3.1 s 至 3.7 s),调相机在灰色预测 PI 控制策略下,能够快速捕捉电压跌落趋势并迅速增大无功输出。仿真结果显示,灰色预测 PI 控制下的母线电压与传输功率极值均有所提升,且电压回升的拐点较常规 PI 控制提前了 0.01 s。在

恢复第二阶段(3.7 s 至系统稳态),灰色预测 PI 控制的性能优势得到了显著体现。在抑制母线电压超调方面,峰值由常规 PI 控制下的 234.5 kV 降至 228.5 kV,有效抑制了恢复期的二次波动。在响应速度方面,灰色预测 PI 控制下的母线电压于 4.25 s 便恢复至稳态值,较常规 PI 控制提前了 0.67 s;同时,直流输送功率也提前 0.5 s 趋于平稳。这表明,灰色预测通过对系统状态的前瞻性预判,能够有效协调故障后期励磁功率的退出时机,缓解常规 PI 控制积分累积导致的恢复期振荡问题。

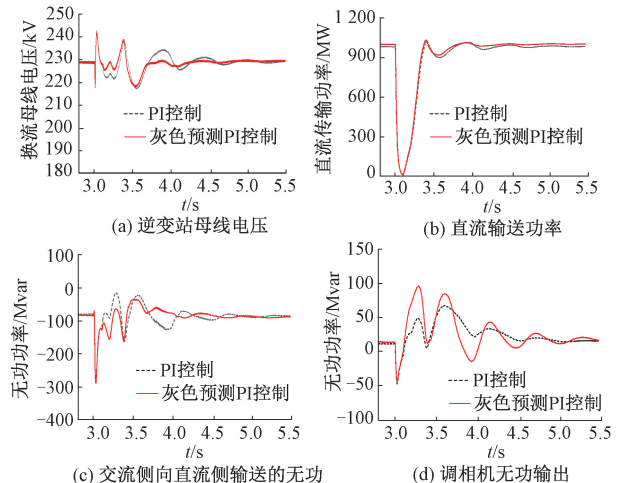


图 10 4 种电气量变化波形 (直流短路故障)

Figure 10 Waveform of change in four electrical quantities (DC short-circuit fault)

3.3 无功负荷突增

3.3.1 感性无功负荷突增

为进一步验证所提灰色预测 PI 控制策略在无功负荷突增工况下的动态响应能力,仿真设置在稳态运行至 3 s 时向受端交流母线投入 150 Mvar 的感性无功负荷。图 11 展示了两种控制方式下不同电气量的变化波形。

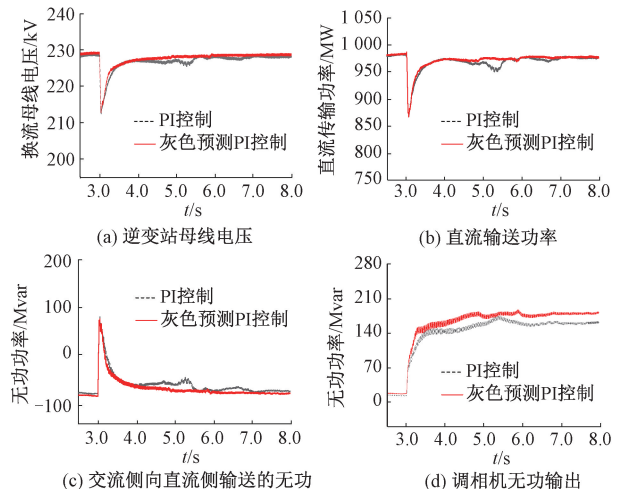


图 11 4 种电气量变化波形 (突增感性无功负荷)

Figure 11 Waveform of change in four electrical quantities (sudden inductive reactive load)

由图 11 可知,当 $t < 3$ s 时,系统处于稳态运行时,采用灰色预测 PI 控制的逆变侧母线电压、直流有功功率及无功交换功率的波形更为平滑。当 $t = 3$ s 时,灰色预测 PI 控制对逆变侧母线电压及交直流无功流动的极值提升不明显,与常规 PI 控制基本持平,但其优势体现在随后的动态恢复过程中。感性无功负荷投入后,采用灰色预测 PI 控制的 4 种电气量均以更快的速度回归稳态。这归功于 GM(1,1) 模型对系统演化趋势的敏锐感知,通过缩短无功响应时间来提高系统恢复稳态的速度。

3.3.2 容性无功负荷突增

设置系统稳态运行至 3 s 时向受端交流母线投入 150 Mvar 的容性无功负荷。图 12 展示了两种控制方式下 4 种关键电气量的波形对比。

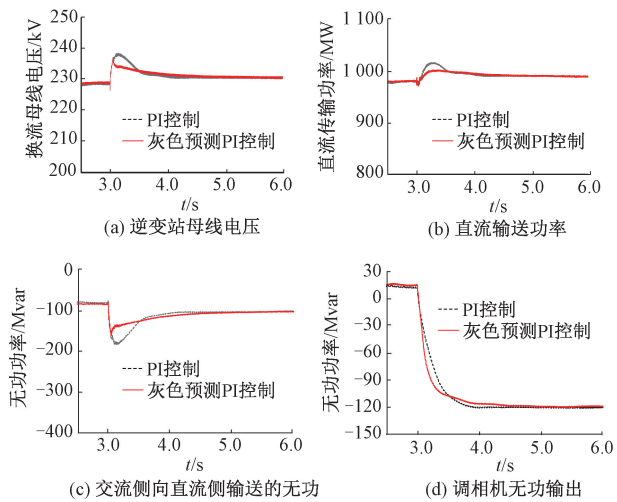


图 12 4 种电气量变化波形(突增容性无功负荷)
Figure 12 Waveform of change in four electrical quantities (sudden capacitive reactive load)

由图 12 可知,当系统发生容性无功负荷突增时,灰色预测 PI 控制系统具备更快的响应能力,调节时间较常规 PI 控制缩短 0.14 s,该优势主要源于预测机制所赋予的前瞻性调节能力,显著抑制了系统各关键电气量的超调幅值及暂态极值。具体而言,在灰色预测 PI 控制策略下,直流输送功率峰值降至 1 000.5 MW,逆变侧母线电压峰值降至 235.5 kV,交直流无功流动峰值控制在-159 Mvar。相比之下,常规 PI 控制的对应数值分别为 1 018 MW、239 kV 和-184 Mvar。数据对比表明,采用灰色预测 PI 控制策略后,直流功率超调量减小了 17.5 MW,母线电压超调量降低了 3.5 kV,交直流系统间的无功冲击削减了 25 Mvar。这表明,灰色预测 PI 控制策略显著增强了调相机无功调节的时效性,通过加速无功平衡进程,有效改善了逆变侧母线电压的暂态恢复轨迹,使其过渡更为平滑。

综合上述故障工况的仿真结果可知,所提灰色预测 PI 控制策略不仅能有效缓解交直流短路以及感性负荷突增等故障引起的电压跌落,对容性负荷突增引起的电压跃升及波动同样具有优异的抑制作用,验证了该策略在多种工况下提升受端电网电压稳定性的有效性和普适性。

4 结论

本文提出了一种基于灰色预测理论的同步调相机 PI 励磁控制策略,并通过 PSCAD/EMTDC 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台验证了其有效性。研究表明,该策略通过前瞻性捕捉受端母线电压演化趋势,有效补偿了励磁系统的大惯性滞后,使调相机具备更优的无功调节能力与响应速度。在交直流短路故障及无功负荷突增等复杂工况下,该控制策略显著抑制了电压超调与振荡,有效缩短了系统调节时间,提升了暂态电压支撑能力。该控制策略融合了常规 PI 控制的稳定性与灰色预测的前瞻性优势,为提升 HVDC 受端系统调相机励磁控制性能提供了一种切实可行的工程解决方案。

参考文献:

[1] Liu Jialiang, Lei Jiaying, Li Chun, et al. Research on active voltage support control method for distribution static synchronous compensator[J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 55-64. [刘嘉棕, 雷家兴, 李春, 等. 配电网静止同步补偿器的主动电压支撑控制方法研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 55-64.]

[2] Hua Wen, Xiong Hongtao, Zhou Yongzhi, et al. Dynamic reactive power characteristic analysis of inverters under the commutation failure faults in HVDC systems[J]. Energy Reports, 2022, 8: 75-82.

[3] Wang Shunliang, Xie Yang, Ma Junpeng, et al. Coordinated control strategy for a UHVDC hierarchical connection system based on DC current control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 167-178. [王顺亮, 谢洋, 马俊鹏, 等. 基于直流电流控制的特高压直流分层接入系统协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 167-178.]

[4] Su Changsheng, Yin Chunya, Li Fengting. Commutation failure analysis in HVDC transmission system based on DC current dynamic rise[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(3): 204-209. [苏常胜, 尹纯亚, 李凤婷. 基于直流电流动态上升的高压直流输电系统换相失败分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(3): 204-209.]

- [5] He Zhiyuan, Gao Chong, Ding Xiao, et al. A review of commutation failure prevention technology for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2735-2746. [贺之渊, 高冲, 丁晓, 等. 多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2735-2746.]
- [6] Yan Jun, Wang Mingdong, Li Zhongwen. Research on variable universe fuzzy PI control of static var compensators[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(9): 64-70. [闫君, 王明东, 李忠文. 静止无功补偿器变论域模糊PI控制研究[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(9): 64-70.]
- [7] Hu Jilei, Liu Xuecan, Jiang Ningqiang, et al. IPEBS method for transient stability analysis of power system with SVC[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 277-284. [胡继磊, 刘雪桀, 江宁强, 等. 含SVC电力系统的IPEBS法暂态稳定分析[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 277-284.]
- [8] Zhu Hongchao, Shen Yijun, Xiong Hongtao, et al. Capacity configuration and coordinated control strategy of synchronous condensers and static reactive power compensation devices[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(6): 47-55. [朱宏超, 沈轶君, 熊鸿韬, 等. 调相机与静态无功补偿装置的容量配置和协调控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(6): 47-55.]
- [9] Ouyang Jinxin, Lin Yaowei, Ye Zhiqi, et al. Electro-thermal modeling and thermal analysis of high-inertia synchronous condenser converters[J]. Electricity, 2025, 6(3): 53.
- [10] Lee J, Jo H, Kim S. Optimal determination of synchronous condenser placement and voltage setting for enhancing power system stability[J]. Energies, 2025, 18(24): 6474.
- [11] Huo Chengxiang, Yu Dahai, Ma Xiaoguang, et al. Impact of dynamic gain of excitation system on dynamic damping of salient-pole generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 116-121. [霍承祥, 于大海, 马晓光, 等. 励磁系统动态增益对凸极发电机动态阻尼的影响[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 116-121.]
- [12] Cao Wei, Zhang Tian, Fu Yesheng, et al. Research and application for increasing inertia and improving frequency response of power system by using synchronous condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 1-10. [曹伟, 张甜, 傅业盛, 等. 同步调相机增强电力系统惯性和改善频率响应的研究与应用[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 1-10.]
- [13] Xiao Yang, Li Zhiqiang, Cheng Lin, et al. AVC comprehensive coordinated control strategy of centralized condenser in northwest power grid[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 270-279. [肖洋, 李志强, 程林, 等. 西北电网集中式调相机AVC综合协调控制策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 270-279.]
- [14] CIGRE. Guide on the assessment, specification and design of synchronous condenser for power system with predominance of low or zero inertia generators[EB/OL]. (2022-11)[2026-01-24]. <https://www.e-cigre.org/publications/detail/885> guide on the assessment specification and design of synchronous condenser for power system with predominance of low or zero inertia generators. html.
- [15] Chen Qiang, Wang Hua, Wang Kewen, et al. PSVR parameters adjustment on large capacity synchronous condensers[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2020, 41(4): 81-86. [陈强, 王骅, 王克文, 等. 大容量调相机PSVR参数调整[J]. 郑州大学学报(工学版), 2020, 41(4): 81-86.]
- [16] 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. [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.]
- [17] Wu Zhenlong, Li Lin, Liu Yanhong. Path tracking of agricultural machinery based on fully actuated control approaches[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(4): 24-31. [吴振龙, 李林, 刘艳红. 基于全驱控制方法的农机路径跟踪控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2025, 46(4): 24-31.]
- [18] Li Yujiang, Chen Ping, Qi Lele, et al. Optimal design of excitation control system of phase modulation camera based on fuzzy PID[J]. Electric Age, 2025(3): 146-152. [李禹江, 陈平, 祁乐乐, 等. 基于模糊PID的调相机励磁控制系统优化设计[J]. 电气时代, 2025(3): 146-152.]
- [19] Zhang Changfu, Wang Tianhe. Variable universe fuzzy PI speed control of permanent magnet synchronous motor for vehicle traction[J]. Electrical Machinery Technology, 2025(6): 25-29. [张长福, 王天鹤. 车用驱动永磁同步电动机变论域模糊PI速度控制[J]. 电机技术, 2025(6): 25-29.]
- [20] Liang Xi. Design and implementation of medium frequency Induction heating power supply based on fuzzy neural network BP-PI Control[D]. Wuhan: Hubei University of Automotive Technology, 2025. [梁锡. 基于模糊神经网络BP-PI控制的中频感应加热电源设计与实现[D]. 武汉: 湖北汽车工业学院, 2025.]

- [21] Wang Mingdong, He Shengxiang, Li Xiaolei, et al. Grey prediction PI control of direct drive permanent magnet synchronous wind turbine[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5): 189–192. [王明东, 何胜祥, 李晓蕾, 等. 直驱永磁同步风力发电机灰色预测 PI 控制 [J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 189–192.]
- [22] Bošković M Ć, Šekara T B, Stojić D M, et al. Novel tuning rules for PIDC controllers in automatic voltage regulation systems under constraints on robustness and sensitivity to measurement noise[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 157: 109791.

Excitation Control Strategy of Synchronous Condenser Based on Grey Prediction PI for HVDC Receiving-end System

WANG Mingdong¹, LI Chongchong¹, LIANG Jiaojiao², LI Zhongwen¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Yellow River Water Resources and Hydropower Development Group Co. , Ltd. , Zhengzhou 450004, China)

Abstract: Aiming at the problem that the conventional PI excitation control was prone to bus voltage overshoot and oscillation in the fault recovery stage after the large capacity synchronous condenser was connected to the high voltage direct current (HVDC) receiving end system, a PI excitation control strategy of synchronous condenser based on grey prediction model GM(1,1) was proposed in this study. In this strategy the predicted value of voltage deviation was obtained in advance by grey modeling and trend prediction of the receiving bus voltage sequence, and was used as the input of the PI controller to realize the forward-looking adjustment of the excitation voltage. Based on the CIGRE standard test system, a PSCAD/EMTDC and MATLAB/Simulink co-simulation platform was constructed. Under various typical disturbance conditions, the dynamic response characteristics of grey prediction PI control and conventional PI control were compared and analyzed. The simulation results showed that the proposed control strategy could effectively compensate the large inertia lag of the excitation system, significantly suppress the bus voltage overshoot and shorten the system adjustment time. With the three-phase short-circuit fault, the minimum value of bus voltage was increased by about 4. 5 kV, the minimum value of DC transmission power was increased by about 31 MW, and the system recovery time was significantly shortened. This method had the characteristics of low computational complexity and strong real-time performance, which could provide an effective technical way for the optimization of excitation control of synchronous condenser in HVDC receiving-end system.

Keywords: synchronous condenser; high voltage direct current; excitation control; PI; grey prediction