

电力电子变换器的建模与非线性控制方法探讨

滕萃 张效 张菁华

青岛城市学院, 山东青岛, 266106;

摘要: 电力电子变换器的建模与非线性控制属于电力电子技术的重要组成部分, 其建模精度和控制效果同电力电子系统是否能稳定运行以及电能变换质量休戚相关, 数学模型是控制策略设计的关键基础, 在建模和控制实现期间, 常常会因为变换器的非线性特性, 参数时变因素, 外界扰动以及控制算法缺陷等因素而产生各种控制问题。控制问题的产生另外会使变换器的动态响应速度下降, 并促使稳态误差增大, 鲁棒性不足之类的恶化现象发生, 从而缩减电力电子系统的运行可靠性, 文章先介绍非线性建模方法的种类及其控制问题产生的原因, 再全面论述建模阶段和控制实现阶段优化控制效果的实际办法, 最后归纳出建模与控制的主要准则, 给电力电子变换器的设计研发和性能优化工作给予技术支持。

关键词: 电力电子变换器; 非线性建模; 控制策略; 实操措施; 运行可靠性

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.070

引言

电力电子技术快速发展之际, 变换器的应用规模不断增大, 非线性建模与先进控制方法因具备适配性强, 控制精度高, 鲁棒性佳等诸多优势, 渐渐成为提升变换器性能的主要技术手段。不过, 电力电子变换器自身存在着开关非线性, 参数时变这样的固有属性, 受诸多外部因素共同影响, 控制效果的优化很难彻底达成, 电力电子变换器长时间处于复杂工况当中, 既要承受负载突变的多次重复作用, 还要应对输入电压波动带来的运行状态变化。所以, 采用科学有效的实际操作手段, 全方位地展开建模与非线性控制优化工作, 覆盖模型构建, 控制实现以及验证优化等层面, 这对于保证电力电子变换器稳定运行, 提升其电能变换质量, 缩减运维成本而言十分关键。

1 电力电子变换器非线性建模方法类型及控制问题成因

1.1 基于机理分析的建模方法

基于机理分析的建模方法属于电力电子变换器建模中最基础的方法种类, 主要是由于对变换器电路拓扑和器件特性的机理推导所致, 按照建模思路可划分成状态空间平均法, 离散时间建模法以及混杂系统建模法, 状态空间平均法大多应用于中低频小信号工况下的建模, 这个阶段将变换器的状态变量在一个开关周期内进行平均化处理, 消去开关动作的离散特性, 得到连续的平均状态方程, 该类建模方法物理意义清晰, 计算复杂度低, 但在高频大信号工况下建模精度不足, 和对开关

非线性特性的简化处理, 忽略寄生参数等要素存在联系。离散时间建模法应用于需要精准描述离散动态特性的场景, 将一个开关周期划分为导通和关断两个阶段, 分别建立电路方程并推导状态转移方程, 其建模精度高, 但模型复杂度随拓扑结构复杂化而显著提升, 这主要与开关动作的离散性, 状态变量的跳变特性, 建模过程中未简化高阶项等状况相关。

1.2 基于智能算法的建模方法

基于智能算法的建模方法指利用人工智能技术的非线性拟合能力, 通过数据驱动方式构建变换器模型而产生的方法类型, 其特点和性能同算法特性关联紧密, 神经网络建模法大多应用于复杂拓扑或未知机理的变换器建模, 通过大量输入输出数据训练得到黑箱模型, 无需深入了解内部机理, 适应性强, 但需要充足的高质量训练数据作为支撑, 主要是由于神经网络的泛化能力依赖数据覆盖度, 训练样本不足或数据噪声过大会导致模型精度下降。支持向量机建模法常见于小样本数据场景, 基于统计学习理论寻找最优分类超平面实现输入输出关系拟合, 泛化能力强, 建模精度高, 但模型训练时间较长, 计算成本较高。

1.3 控制问题的核心成因

控制问题的产生因变换器的非线性特性, 控制策略设计缺陷以及外界扰动等因素共同作用, 使得控制效果未达预期而产生, 这类问题大多表现为动态响应迟缓, 超调量大, 稳态误差超标等, 常见于负载突变, 输入电压波动, 参数漂移等工况下, 主要和控制策略未充分适

配非线性特性,算法参数整定不合理,扰动抑制能力不足等因素相关,非线性特性会造成系统模型参数时变,传统线性控制策略难以精准跟踪,引起控制偏差;控制策略设计缺陷会导致算法对工况变化的适应性差,比如滑模控制的抖振未有效抑制,模型预测控制的滚动优化求解不及时;外界扰动会造成系统运行点偏移,若控制算法的抗干扰能力不足,就会产生控制精度下降的问题,而且如果情况很糟糕,还可能致使系统不稳定。

2 电力电子变换器建模阶段的控制适配实操措施

2.1 建模方法选型优化措施

建模方法的合理选型会直接左右控制策略的适配性,科学的选型设计可有效提升控制效果并缩减控制问题产生的可能性,在方法选择上,应首选状态空间平均法用于线性控制策略设计,以减小建模复杂度,从而提升控制算法的实时性;采用离散时间建模法用于需要精准控制的场景,适配滑模变结构控制,模型预测控制等非线性控制策略,以此来加强控制的精准度和动态响应速度;选用智能算法建模法用于复杂工况或未知机理的变换器,在确保模型适配性之时提升控制策略的自适应能力;适当结合机理分析与智能算法的混合建模方法,既保留机理模型的物理意义,又利用智能算法弥补简化假设带来的精度不足,这样做既能提升建模效率又可改良模型的泛化能力,加强控制策略的鲁棒性。

2.2 模型参数辨识管控措施

模型参数的准确性会直接左右控制策略的设计质量,要牢牢掌握参数辨识各个环节的关键操作点,才可以有效缩减建模误差引发的控制问题,进行参数辨识之前,得先优化数据采集方案,保证采集的输入输出数据覆盖变换器的主要运行工况,避免数据样本单一导致的辨识精度不足,还要对采集的数据执行预处理操作,去除噪声干扰和异常值,使得数据的可靠性和有效性合乎设计标准,防止因为数据质量问题致使参数辨识结果偏差。进行参数辨识时,要选择合适的辨识算法,比如递推最小二乘法,卡尔曼滤波算法等,根据参数类型和模型特性调整算法参数,不能让算法收敛速度过慢或出现发散现象,这样就有可能在辨识过程中形成参数偏差或者辨识失败。辨识完成后,要通过仿真验证和实验测试验证参数的准确性,将辨识得到的模型参数代入控制策略中,观察控制效果是否满足要求,若存在偏差则重新

调整辨识算法或补充采集数据。

2.3 模型验证与修正实操措施

模型验证与修正属于提升建模精度,保障控制适配性的关键部分,要按照建模方法类型和控制需求来采取相应的举措,机理分析类模型验证之前应当制订专门的验证方案以把控模型的适配范围,在仿真平台搭建变换器模型,对比仿真结果与理论计算值,验证模型的稳态特性和动态特性;在硬件实验平台开展实验测试,采集实际运行数据,对比实验结果与仿真结果,分析建模误差来源。针对复杂工况下的模型,可利用实时仿真系统,模拟不同负载,不同输入电压下的运行状态,保证模型在全工况范围内的准确性;至于智能算法类模型,则可用预留的测试数据验证模型的泛化能力,或通过改变工况参数测试模型的自适应能力,验证时间须符合设计要求,机理分析类模型的仿真验证应覆盖主要运行工况,实验验证不少于3组不同工况的测试;如果是混合建模方法构建的模型,那么验证时间则不得少于5组复杂工况的测试,从而确保模型参数的准确性,改善控制策略的适配性。

3 电力电子变换器控制实现与优化阶段的实操措施

3.1 控制算法参数整定措施

形成起科学的参数整定机制,就能优化控制算法的性能,这是控制实现阶段做好控制效果提升工作的前提所在,要针对不同控制策略类型执行参数整定,着重调整影响动态响应,稳态精度,鲁棒性的关键参数,留意参数调整后控制效果的变化,并把参数值,调整过程,控制性能指标等情况记录下来,创建参数台账,跟进参数的优化迭代状况。对于PID控制策略,可以采用工程整定法,比如临界比例度法,响应曲线法,通过实验确定比例系数,积分时间和微分时间;对于滑模变结构控制,可以安装仿真分析工具,通过调整滑模面参数和趋近律参数,平衡动态响应速度和抖振抑制效果。

3.2 控制问题实时处置措施

在控制实现过程中,如果察觉到存在控制问题,要按照问题类型,严重程度,影响范围等情况来采取有针对性的解决办法,以阻止控制效果进一步恶化,对于动态响应迟缓,超调量大的问题,可以采用参数调整法来进行处理,也就是优化控制算法的关键参数,比如增大比例系数提升响应速度,调整积分时间减小超调量,从

而改善动态响应特性。在执行的时候,首先要通过仿真或实验分析参数对控制效果的影响规律,保证参数调整的针对性和有效性,然后逐步迭代调整参数,使得控制效果达到设计要求。对于稳态误差超标,抗干扰能力不足的问题,可以采用算法改进法实施处理,通过增加前馈控制,扰动观测器等模块,补偿外界扰动和模型误差的影响,从而提升控制精度和鲁棒性。在执行此过程之前,务必先分析扰动来源和模型误差特性,并且设计合适的补偿模块,然后将补偿模块融入原有控制算法中,保证补偿效果显著,等到算法改进之后,再通过仿真和实验验证控制效果,并对参数进行微调优化。针对那些控制失稳,振荡剧烈的严重问题,则必须采取重构控制策略的应对举措,比如更换控制算法类型,重新设计控制律结构,以此恢复系统的稳定性,压制控制问题持续蔓延扩大。

3.3 工况适配优化措施

针对控制实现阶段的工况变化要素,要采取有针对性的适配措施,缩减工况波动给控制效果造成的伤害,防止控制问题出现,优化控制算法的自适应能力,通过在线参数辨识,模型预测等手段,实时调整控制参数以适配工况变化,比如负载突变时快速调整比例系数和积分时间,输入电压波动时通过前馈控制补偿扰动影响。在多工况切换场景中,可以采用分段控制策略,预先设定不同工况下的最优控制参数,通过工况识别模块自动切换参数,把工况变化对控制效果的影响降到最低。定期对控制算法的工况适配性进行测试验证,比如模拟宽负载范围,宽输入电压范围下的运行状态,分析控制效果的变化规律,从而改良控制算法的工况适配能力,减缓控制性能恶化的速度。

3.4 硬件平台适配措施

要合理优化硬件平台性能,防止因硬件特性限制导致控制算法无法有效实现,出现控制问题,选用高性能的微处理器或FPGA芯片,保证控制算法的实时性,满足复杂控制策略的计算需求;优化硬件电路设计,减小信号干扰和延迟,比如采用高速采样模块提升数据采集精度,设计合理的驱动电路保证开关器件动作准确;在硬件平台调试阶段,对控制算法的执行时间,采样频率等指标进行测试,及时发现并解决硬件瓶颈问题。在系统集成阶段,加强软硬件的协同调试,确保控制算法在硬件平台上能够稳定运行,控制效果达到设计要求;在

桥梁显眼位置设置限载标志,清楚标明桥梁的荷载限制,引导车辆合法通行;加大对硬件平台运行状态的监测力度,及时了解硬件性能的变化状况,一旦出现硬件故障或性能衰减就采取维修更换措施,免除硬件因素引发的控制问题。

4 结语

电力电子变换器的建模与非线性控制优化对于保障变换器稳定运行,提升其电能变换质量十分关键,这离不开模型构建,控制实现和验证优化这三个方面的系统性操作举措,按照建模方法类型及控制问题成因来说,基于机理分析的建模方法,基于智能算法的建模方法等各类方法都会应用,控制问题的成因包括非线性特性,设计缺陷,外界扰动等。在建模期间,经由优化建模方法选型,精准辨识模型参数,规范验证修正流程,预设设计控制策略等手段,可以有效地缩减控制问题产生的几率;而在控制实现与优化阶段,则要依靠科学的参数整定,实时处置控制问题,做好工况适配优化并提升硬件平台性能等办法,从而尽早阻止控制效果进一步恶化,保证变换器运行可靠。建模与控制优化工作应遵照以精准建模为基础的方针,并具备工况适配性,做到全流程控制,还要把实时性和稳定性相统一,这样才能达成建模,控制与硬件三者协同推进的目标,日后,伴随新算法,新硬件不断涌现,电力电子变换器的建模与非线性控制技术将会向着智能化,自适应化以及高性能化的方向发展,进而给电力电子系统的安全稳定运行给予更为牢靠的支撑。

参考文献

- [1] 李建英,王良俊. 电力电子系统中EMI建模与抑制方法研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(17):123-130.
- [2] 王志强,刘涛. 面向高频电力变换器的EMC设计与仿真分析[J]. 电气与能效管理技术,2022,44(10):67-72.
- [3] 郑凯,黄瑞. 高密度电力电子系统的电磁兼容设计方法探析[J]. 电力电子技术,2023,57(3):38-45.
- [4] 张嘉岷,张福州,李嘉,等. 多变换器模块ISOP系统及其均流均流控制[J]. 电力电子技术,2023,57(1):109-113.
- [5] 庄勇,王玮,唐芬,等. 主从控制变频器电压比例分离控制策略[J]. 电力电子技术,2023.