

华北电力大学

学术硕士学位论文

基于双馈风机的自补偿机制恒导纳

建模方法

**Constant admittance modeling method of
self-compensation mechanism based on doubly-fed
wind turbine**

王禹博

2025 年 5 月

国内图书分类号：TM743
国际图书分类号：621.3

学校代码：10054
密 级：公开

学术硕士学位论文

基于双馈风机的自补偿机制恒导纳 建模方法

硕 士 研 究 生：王禹博

导 师：刘崇茹教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科 专 业：电气工程

所 在 学 院：电气与电子工程学院

答 辩 日 期：2025 年 5 月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM743

U.D.C: 621.3

Thesis for the Academic Master's Degree

**Constant admittance modeling method of
self-compensation mechanism based on doubly-fed
wind turbine**

Candidate:	Yubo Wang
Supervisor:	Prof.Chongru liu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical Engineering
Date of Defence:	May, 2025
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

近年来,我国以风电、光伏发电为代表的新能源发展成效显著,装机规模稳居全球首位,发电量占比稳步提升,成本快速下降。在双碳战略驱动的新能源发电技术规模化发展进程中,双馈异步风力发电机(Doubly fed Induction Generator, DFIG)的建模成为提升系统仿真有效性的关键问题。现有仿真平台中 DFIG 模型时变特性导致的仿真收敛性不足及调试复杂度较高,本研究提出基于 DFIG 的自补偿恒导纳建模方法。其中包括发电机转子的分层设计的恒导纳建模与换流器开关频率变化时的恒导纳建模方法,具体内容如下:

(1) 发电机转子的分层设计的恒导纳建模方法:通过建立发电机节点电压与磁链方程,将系统导纳矩阵分解为时不变矩阵和时变矩阵,重点解析时变矩阵中与时间参数强关联的转子角速度变量。基于转子角速度的取值范围,采用典型值遴选机制实现各运行区间的等效参数映射,经误差分析控制其分段建模误差处于工程允许阈值,提前处理导纳矩阵使其恒定。

(2) 换流器开关频率变化时的恒导纳建模方法:针对换流器恒导纳模型因开关频率变化,虚拟损耗会发生变化,提出基于负阻抗滑动变阻器的改进方法。在保持恒导纳模型核心架构的基础上,通过负阻抗滑动变阻器的系数的控制,使其和开关频率联系,动态调节等效导纳矩阵的补偿参数,从而使虚拟损耗在开关频率升高时也不会导致升高。仿真结果表明,该方法在开关频率升高工况下,既能保留恒导纳模型的静态特性,又可通过动态参数调整有效跟踪功率器件的高频开关行为,显著提升变流器模型的暂态仿真精度。

(3) 基于 MATLAB/Simulink 平台建立包含风力机、转子角速度遴选机制的发电机 DFIG 及负阻抗滑动变阻器补偿的恒导纳换流器的仿真架构,通过对比仿真实验验证:单独添加转子角速度遴选机制的发电机 DFIG,在转子角速度变化时,所构建模型的暂态响应曲线与理论推导具有高度一致性,添加负阻抗滑动变阻器补偿的恒导纳换流器的 DFIG 系统仿真结果表明,所提恒导纳模型在静态稳定与暂态稳定上均与原型机有较高的吻合,对称故障与不对称故障暂态过程中保持导纳矩阵稳定性的同时,有效提升了电磁暂态仿真精度。

关键词: 双馈异步风力发电机; 典型值遴选机制; 恒导纳模型; MATLAB;

Abstract

In recent years, China has achieved significant progress in the development of new energy technologies, particularly in wind and photovoltaic power generation. The installed capacity of these technologies ranks first globally, with their share of power generation steadily increasing and costs rapidly declining. In the context of large-scale development driven by the "dual-carbon" strategy, the modeling of doubly fed induction generators (DFIGs) has become a critical challenge for enhancing the effectiveness of system simulations. Existing DFIG models in simulation platforms exhibit notable time-varying characteristics, leading to insufficient simulation convergence and high debugging complexity. To address these issues, this study proposes a self-compensating constant admittance modeling method based on DFIG. This approach includes two key components: a constant admittance modeling method with hierarchical rotor design and a constant admittance modeling method under varying converter switching frequencies. The details are as follows:

(1) Constant admittance modeling with hierarchical rotor design: By establishing the generator node voltage and magnetic flux equations, the system admittance matrix is decomposed into time-invariant and time-varying matrices, with a focus on analyzing the rotor angular velocity variable in the time-varying matrix, which is strongly correlated with time parameters. Based on the operational range of rotor angular velocity, a typical value selection mechanism is adopted to achieve equivalent parameter mapping across operational intervals. Error analysis ensures that the segmented modeling errors remain within engineering permissible thresholds, thereby pre-processing the admittance matrix to maintain its constancy.

(2) Constant admittance modeling under varying converter switching frequencies: To address the issue where virtual losses in conventional constant admittance models vary with switching frequency changes, an improved method based on a negative-impedance sliding rheostat is proposed. While retaining the core structure of the constant admittance model, the coefficients of the negative-impedance sliding rheostat are dynamically adjusted based on switching frequencies, thereby compensating the equivalent admittance matrix parameters. This ensures that virtual losses do not increase even at elevated switching frequencies. Simulation results demonstrate that this method preserves the static characteristics of the constant admittance model while effectively tracking high-frequency switching behaviors of power devices through dynamic parameter adjustment, significantly enhancing transient simulation accuracy.

(3) Simulation validation: A simulation framework is established on the MATLAB/Simulink platform, incorporating a wind turbine, a DFIG with rotor angular velocity selection mechanisms, and a constant admittance converter compensated by a negative-impedance sliding rheostat. Comparative simulations confirm that: The transient response curves of the DFIG model with the rotor angular velocity selection mechanism align closely with theoretical derivations under varying rotor speeds. For the DFIG system with the compensated constant admittance converter, the proposed model exhibits high consistency with the prototype in both static and transient stability. Additionally, it maintains admittance matrix stability during symmetrical and asymmetrical fault transients while effectively improving electromagnetic transient simulation accuracy.

Keywords: Doubly-fed induction generator (DFIG), Typical value selection mechanism, Constant admittance model, MATLAB

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.2 课题研究现状.....	2
1.2.1 发电机仿真建模.....	2
1.2.2 换流器仿真建模.....	3
1.2.3 电磁暂态仿真.....	3
1.3 本文主要工作.....	4
第 2 章 双馈风机的仿真建模	6
2.1 风力机部分.....	6
2.1.1 风力机重要参数.....	6
2.1.2 风力机功率控制.....	8
2.2 发电机部分.....	10
2.2.1 电磁耦合部分.....	10
2.2.2 机械力矩部分.....	13
2.2.3 MATLAB 仿真实现	14
2.3 换流器部分.....	15
2.3.1 恒导纳模型基本原理.....	16
2.3.2 基于负阻抗补偿的恒导纳模型.....	19
2.4 本章小结.....	20
第 3 章 发电机恒导纳模型	22
3.1 整理发电机模型.....	22
3.2 基于遴选设计的恒导纳模型研究	25
3.3 遴选设计的恒导纳模型误差分析	26
3.4 遴选设计的恒导纳模型的影响	27
3.4.1 遴选设计对计算效率和实现复杂度的影响	27
3.4.2 遴选设计对系统动态特性的影响.....	28
3.4.3 遴选设计在电力系统中的优势.....	28
3.5 发电机恒导纳模型 MATLAB 实现.....	28
3.6 本章小结.....	30
第 4 章 基于滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型	31
4.1 模型结构与计算逻辑.....	31
4.2 参数优化设计.....	33
4.2.1 基于暂态误差最小的参数优化.....	33
4.2.2 基于切换系统稳定的参数优化.....	36

4.2.3 基于不同开关频率的滑动变阻器系数参数优化	39
4.3 滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型 MATLAB 实现	40
4.4 本章小结	41
第 5 章 算例仿真与验证	43
5.1 系统参数配置	43
5.2 自补偿发电机仿真结果	44
5.2.1 静态稳定仿真	45
5.2.2 暂态稳定仿真	48
5.3 完整自补偿发电机仿真结果	50
5.3.1 换流器控制仿真	50
5.3.2 静态稳态仿真	52
5.3.3 暂态稳定仿真	53
5.4 仿真模型有效性总结	55
5.5 本章小结	56
第 6 章 结论与展望	57
6.1 总结	57
6.2 展望	57
参考文献	59

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景

在全球应对气候变化的紧迫形势下,《巴黎协定》设定的温控目标正深刻影响着能源体系变革方向。国际能源理事会(WEC)最新研究显示,目前已有 120 个国家和地区将构建可再生能源主导的电力系统作为战略选择,这些缔约方计划在 2030 年前实现清洁能源发电占比超过 65% (World Energy Trilemma Index 2023)。作为全球能源转型的重要参与者,中国提出的“双碳”目标在国际社会产生显著示范效应^[1-4]。联合国环境署测算显示,这项承诺将使全球碳预算减少约 230 亿吨 CO₂当量,相当于 2022 年全球碳排放总量的 60% (2023 年排放差距报告)。为了实现《2030 年前碳达峰行动方案》设定的非化石能源占比目标,我国每年需要新增的可再生能源发电量相当于 1.2 个三峡电站的年发电能力 (按 2020 年发电量基准估算)^[5]。

在众多清洁能源技术路线中,风电的快速发展在近年来尤为重要^[6-7]。过去十年间,得益于技术迭代与规模效应,陆上风电的度电成本大幅下降 68%,目前成本最低已达到 0.035 美元/千瓦时 (IRENA,2023)^[8]。这种成本优势推动全球风电装机呈现爆发式增长,仅 2023 年新增装机量就超过 2015-2018 年四年的总和^[9]。而且,中国在这场绿色革命中扮演着关键角色,其新增装机贡献度达到 46.7%,九大清洁能源基地建设正在建设当中 (全球能源监测组织数据)。以库布齐沙漠风电集群为例^[10],该基地单日最大出力已达 8.2GW,相当于北京市冬季日均用电负荷的 42%,充分展现了我国在新能源领域的实践成果^[11]。大规模风电并网正在重塑电力系统的基本范式。国家电力调度控制中心的运行数据显示,2023 年中国电网的新能源渗透率指标^[12-14] (瞬时出力占比) 已突破 36% 临界值,导致系统呈现几大典型特征,首先是惯量稀释效应,它是等效惯性常数下降至传统电网的 1/4^[15];然后是调节能力退化,指的是频率响应速率降低 52%^[16];最后是电压稳定域收缩,指的是 N-1 故障下暂态电压跌落幅度增加 40%^[17-19]。

作为当前主流的风电机型,双馈异步发电机的技术特性在目前备受关注。该机型虽然通过部分功率变流器设计降低了成本,但其控制策略的革新也带来了系统稳定机制的改变。定子磁链定向控制虽然实现了灵活的有功无功调节,却导致传统电力系统赖以稳定的功角机制失效。而且当双馈机组占比超过四分之一时,系统出现次同步振荡的风险将急剧上升^[20-21],这种非线性失稳现象已

成为制约高比例新能源电网安全运行的主要瓶颈^[22]。为此，国际学术界正着力研发新一代电力系统动态模型^[23-24]，试图在精确表征设备特性和保证工程实用性之间找到平衡点，这项突破将直接影响未来十年全球能源转型的进程^[25-29]。

本文主要研究 DFIG 发电机转子角速度发生变化后的发电机恒导纳模型和虚拟损耗不随开关频率增加的换流器恒导纳模型，意在减少模型计算量与资源配置的同时不影响仿真精度。

1.2 课题研究现状

1.2.1 发电机仿真建模

双馈异步风力发电机（DFIG）作为当前风电场的主流机型^[30]，凭借其变速恒频运行特性与灵活的有功/无功调节能力^[31-32]，已在电力系统中实现规模化应用。

目前双馈风机国内外的仿真模型，在工程应用上主要基于相域（Phase Domain, PD）^[33-34]模型与 dq 轴解耦模型^[35-36]。相域模型通过保留 abc 坐标系下的绕组方程完整结构，能够直接反映转子位置角对导纳矩阵的周期性调制效应，但需高频次更新时变系统矩阵的特性使其计算效率明显下降；dq 轴解耦模型虽通过同步速与转差速坐标系的协同映射简化了电感参数时变特性，却在电网频率波动时容易因为坐标变换失配引发功率振荡误差。

近年来，研究者们提出的频域-时域混合建模方法尝试通过将导纳矩阵分解为不同频率段的动态分量^[37-38]（例如将机械运动对应的低频段与变流器开关动作的高频段分开处理），从而缓解传统建模中因转子惯性响应与 IGBT 的微秒级动作时间尺度差异过大导致的仿真步长难以协调的问题。

尽管这种分频段重构的方法在降低计算复杂度方面取得一定进展，但其对宽频振荡现象（如次同步振荡与高频谐波叠加的复杂工况）的动态特性捕捉仍不够精准，且在多频段导纳参数耦合过程中容易出现矩阵参数失配，导致导纳矩阵整体稳定性下降。这些问题使得该方法在实际工程应用中面临仿真精度与动态鲁棒性的双重挑战。

DFIG 建模技术的革新需突破多物理场耦合的数学描述框架，从根源上解决转子动态调制与开关频率自适应调节的协同性问题，同时提升模型对电网不对称故障、谐波畸变等复杂工况的鲁棒性^[39]。当前，基于量子计算加速的并行求解算法与数据-物理融合驱动的智能建模方法正成为研究热点^[40]。

当前双馈机组群仿真的核心困境源于时变导纳矩阵计算量上的指数级膨胀，尤其在机电-电磁混合仿真框架下，旋转坐标系变换接口的时序偏差会诱发

相位延迟累积效应，导致功率动态响应特性的严重失真。传统等效导纳模型将多机组视为独立子系统的简化假设，没有考虑到转子角速度的变化，而在转子角速度变化过程中，误差也就越来越明显，这种建模失真在次同步振荡等复杂动态过程中尤为突出。

针对上述问题，双馈风机恒导纳模型构建技术需要得到创新，其创新方向主要围绕参数稳定性与动态特性再现能力的平衡展开。首先，如果应用 PD 模型等传统变导纳矩阵建模方法，会导致导纳矩阵计算量呈指数增加，难以大规模应用于工程与电磁仿真。然后，导纳矩阵在转子角速度变化的时候也要保持恒导纳矩阵，而如果用强制用同一个恒导纳模型在转子角速度变化时会增加明显误差的，所以需要恒导纳模型与转子角速度适配的方案。

1.2.2 换流器仿真建模

电力电子器件建模作为电磁暂态仿真的核心环节，其模型精度直接影响系统分析的可靠性。在离线仿真领域，双值电阻模型凭借较高的仿真精度获得广泛应用，但其复杂的数值特性导致计算效率难以满足实时仿真需求。主流实时仿真平台普遍采用的恒导纳模型通过恒定导纳特性简化了电磁暂态求解过程，但存在两个显著缺陷：其一，开关动作频繁时易出现数值振荡现象^[41]；其二，存在不可忽略的虚拟功率损耗问题^[42-43]。

现有研究^[44]多聚焦于通过改进数值积分算法加速数值振荡衰减，但此类方法对虚拟功率损耗的抑制效果有限。当前补偿策略与初始化策略的设计普遍忽略了插值算法在离线仿真中的调节作用，采用理想化假设致使模型应用场景受限。这种现象导致传统恒导纳模型难以准确反映实际工况中复杂电磁暂态过程^[45]。

文献^[46]给出负阻抗补偿的恒导纳模型来进行虚拟损耗的抑制在额定开关频率下，负阻抗能够保证虚拟损耗抑制到较低水平，但如果开关频率变化，无法进行阻抗的实时调节，而随着开关频率的增加，导致虚拟损耗依然增长。因此有必要进行换流器恒导纳模型适配与开关频率的方案研究，从而提高实时仿真的精度。

1.2.3 电磁暂态仿真

关于双馈异步风力发电机的恒导纳模型研究，本质上需要借助电磁暂态仿真技术来模拟真实电网环境^[47]。比如常用的 PSCAD、MATLAB 这些仿真工具，虽然每种都有着优秀的模拟环境，但要同时处理几十台风电机组互相影响的情况时，还是会不尽人意。用常规的节点电压法方程计算的时候，虽然用导纳矩

阵计算能稳定模拟单台风机的故障响应，但模拟五十台机组同时运行时，计算量会呈指数性增加，并且拖慢进程，减少储存能力。

而为此，PSCAD 中的 Bergeron 模型^[48]，能根据情况自动调整计算步长。这种方法算变流器开关损耗能够达到可接受的误差范围内，可在电网电压坐标转换时，时序上的表现不尽人意，这 and 实际硬件测试有着很大的差别。PSCAD 本身虽然被行业广泛应用，但 PSCAD 的单线程的内核遇到三十台以上机组时，只能将计算步长缩小到特别小才能勉强实时运行，结果导致电网次同步振荡频率的相位响应出现偏差，这就像用低帧率摄像机拍快速动作，细节容易糊掉。

本文使用 MATLAB/Simulink，它的模块化设计让它成为算法开发的热门选择。有团队^[49]用 Simscape 搭建过等比例缩放的导纳模型，冻结转子角度后确实提升了运算速度，但省掉的锁相环动态耦合让模型在弱电网环境下预测结果偏离实际。而 RTDS 这种专业实时仿真器虽然用上 DSP 阵列并行计算，但要更改恒导纳模型就得更改 FPGA 芯片，开发周期翻倍，对需要频繁调试的研究很不友好^[50]。

还有 HYPERSIM 这种用超级计算机做分布式仿真^[51]，确实能重现两百台机组搞次同步谐振，但它的价格昂贵，价格让普通实验室望而却步^[52]。相比之下 OPAL-RT 的 RT-LAB 平台是软硬件结合，用 FPGA 加速卡配合 Simulink 模型能做到九十台机组实时仿真，不过开发者需要按照特定代码规范改写控制算法，抬高了试错成本。总的来说，各个平台都有其优缺点，需要针对个人的需求，来进行仿真平台的选择，而因为需要进行经常性的更改代码，且不进行弱电网上的仿真，因此本文使用 MATLAB 平台进行仿真模型的搭建。

1.3 本文主要工作

本文围绕 MATLAB 平台下的双馈异步风力发电机电磁暂态仿真展开研究，一方面建立了 MATLAB 平台下的双馈异步发电机电磁暂态计算模型，另一方面针对模型导纳矩阵时变的问题，提出了一种基于考虑转子角速度遴选的双馈异步发电机恒导纳建模方法，并进一步设计了滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型。论文的主要工作如下：

第二章在 MATLAB 环境下搭建了双馈异步发电机的数学模型。MATLAB 的模块化设计分为电路系统和控制系统，二者通过接口函数实现交互。电路系统包括风力机、双馈异步发电机、换流器、电网等模块，根据模块间的串并联关系构建三级递推计算流程，分别用于计算子系统输入、提取诺顿等效参数、求解节点电压并更新电路状态。控制系统包括换流器转子侧矢量控制与网侧电压定向控制，通过回调函数与电路系统实现时序解耦。整理出完整双馈异步发

电机的节点导纳矩阵，发现完整模型的节点导纳矩阵因转子与换流器开关状态的耦合作用而时变，每个仿真步长需进行求逆，导致计算效率严重下降。

第三章提出了一种基于考虑转子角速度遴选设计的双馈异步发电机恒导纳建模方法。通过对发电机导纳矩阵的坐标变换分析，发现时变根源在于定转子互感矩阵的旋转耦合项。利用分层结构，对转子角速度的取值范围进行划分，确保在分层后选出的转子角速度代表值与实际转子角速度在误差上在可接受范围之内，历史电压源补偿后发电机导纳矩阵在任意转速下保持恒定，仿真步长内无需重复矩阵求逆，仅在参数变化时更新一次。尽管变化转子角速度时，分层设计的转子角速度会突变，但会在误差接受范围之内。

第四章设计了基于滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型。针对换流器开关动作引起的导纳突变问题，在离散导通模型中串联可调式滑动变阻器，其阻值实时抵消开关频率导致的导纳波动。补偿后换流器等效导纳矩阵在开关频率变化时虽是变化的，但能够保证在变化后也依然是恒定的导纳矩阵。

第五章完整的展现整体的 DFIG 恒导纳仿真模型，依次进行了转子遴选补偿的发电机测试、完整发电机模型仿真及全系统故障仿真。对发电机恒导纳模型的发生转子角速度的变化实验表明所提基于分层设计的双馈异步风力发电机恒导纳建模方法的正确性，对换流器恒导纳模型的开关频率的变化实验表明所提负阻抗滑动变阻器换流器恒导纳建模方法的正确性，对完整发电机恒模型的仿真表明所搭建的 MATLAB 下双馈异步风力发电机模型的正确性

第六章对本文研究工作进行了总结，并对双馈风机恒导纳模型 MATLAB 场景下的后续发展提出了展望。

第 2 章 双馈风机的仿真建模

双馈异步风力发电机（DFIG）是一种采用绕线转子异步电机与变流器协同运行的发电系统，其技术特征主要体现在机电能量转换架构与控制策略上。系统结构由机械传动链、电磁耦合模块及电力电子控制单元三部分构成：机械传动链包含齿轮箱，将风轮捕获的叶尖速比匹配至发电机额定转速；电磁转换核心为绕线式异步电机，其定子绕组直接接入电网，转子绕组通过滑环装置连接背靠背变流器，换流器默认采用 PI 控制；电力电子单元由转子侧变流器（RSC）与网侧变流器（GSC）组成，通过直流母线耦合形成功率流动通道。

本章将对 DFIG 以下几个方面进行论述：风力机部分，发电机部分，换流器部分，其中风力机包括风力机的参数与控制，发电机包括电磁耦合部分和机械力矩部分，换流器包括恒导纳模型的理论论述以及现有模型的修正与弊端。

2.1 风力机部分

2.1.1 风力机重要参数

在建立风力机及其控制系统的模型过程中，关键的参数主要包括叶尖速比、攻角以及叶片功率系数。这些参数作为风力机气动性能与能量转换效率的核心指标，其动态特性直接影响着整个发电系统的运行效果与稳定性。其中叶尖速比作为风轮旋转状态与风能捕获能力的桥梁参数，不仅反映叶片结构特性与外界风况的匹配程度，更决定着风轮能否在特定风速条件下实现最优功率输出。该参数与叶片弦长分布、翼型气动性能等设计要素密切相关，需要通过精确的数学建模来揭示其对系统动态响应的非线性影响规律。

在风力发电系统中，叶尖速比（Tip Speed Ratio, TSR）的物理含义为叶片旋转时的动能转化效率。该参数通过希腊字母 λ 表征风轮叶片尖端线速度与来流风速的动态比例关系，其数值变化直接引起叶片表面边界层流动状态的改变。当风速波动时，控制系统依据实时计算的叶尖速比值调节发电机转矩或变桨角度，确保风轮始终工作在最大功率系数区间。而且，过高或过低的叶尖速比均会导致机组性能恶化，前者可能引发叶片表面流动分离加剧，后者则会造成风能捕获效率显著下降。在建模过程中需要特别关注叶尖速比与风轮转动惯量、传动系统刚度等机械参数的耦合作用，这些相互作用在阵风扰动工况下将产生复杂的动态载荷波动，叶尖速比的计算遵循特定的公式为：

$$\lambda = \frac{\omega_B r_B}{v_P} \tag{2-1}$$

式中 r_B —— 叶片半径 (m);
 ω_B —— 叶片角速度 (rad/s);
 v_P —— 风速 (m/s)。

双馈异步风力发电机不同于永磁直驱风力发电机与同步发电机，它是有齿轮箱的，由于齿轮箱的增速作用，发电机转子的角速度是叶片角速度的 k 倍 ($k>1$)，即

$$\omega_r = k\omega_B \tag{2-2}$$

式中 ω_r —— 发电机转子角速度 (rad/s);
 k —— 齿轮箱的转动比;

攻角作为调节叶片升力性能的核心因素，其定义为气流方向与翼型弦线形成的几何夹角，通常采用希腊符号 α 进行表征。在风能转换系统中，智能调控模块通过动态优化攻角参数，使发电机组在湍流风况下仍能稳定维持设计工况。该物理量的空间几何关系详见图 2-1 所示的结构示意图，双馈风机通过变桨系统动态调节攻角，以优化风能捕获效率并限制机械载荷。

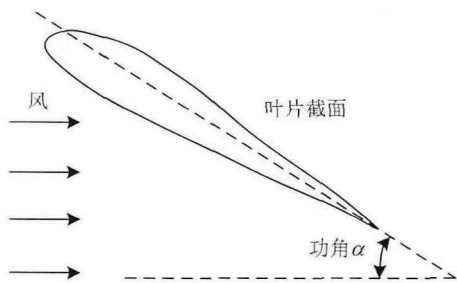


图 2-1 风力机攻角示意图

在风力发电系统的能量转换过程中，当风吹过叶时，叶片开始转动，带动内部的发电机转子旋转。这个过程完成了两次能量转换——首先将流动空气的动能转化为叶片旋转的机械能，继而通过电磁感应原理产生电能。而且，机组对风能的捕获效率并非一成不变，会受到多个关键参数的综合影响。

从工程实践角度看，叶片尺寸是首要考量参数。更大的扫掠面积意味着能捕获更多风能，但需要平衡结构强度和材料成本。空气密度作为环境因素同样不容忽视，在海拔较高区域，稀薄空气会显著降低发电效率。而攻角调节则是现代风机的重要技术指标，通过实时调整叶片迎风角度，可以在不同风速下保持最佳捕能状态。

衡量这些因素综合影响的量化指标，业内普遍采用叶片功率系数 (C_p 值)。

这个反映风能转换效率的核心参数，其定义式为实际捕获功率与理论总风能的比值。根据大量实测数据，现代三叶片水平轴风机 C_p 值通常维持在 0.35-0.48 区间，德国物理学家贝兹通过数学推导得出 0.593 的理论极限值。

对于采用变桨距技术的先进机组而言， C_p 值的动态特性尤其重要。如公式 (2-3)^[53]所示，这一参数与叶尖速比（叶片尖端线速度与风速之比）、实时攻角呈复杂的非线性关系。工程人员常通过三维曲面图进行可视化分析：将叶尖速比设为 X 轴，攻角作为 Y 轴，对应的 C_p 值则沿 Z 轴分布，这样能直观观察到最大效率点在参数空间中的位置。这种研究方法不仅帮助优化控制策略，还为叶片气动外形的改进提供重要依据。

$$C_p(\lambda, \alpha) = (0.44 - 0.0167\alpha) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\alpha}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\alpha \quad (2-3)$$

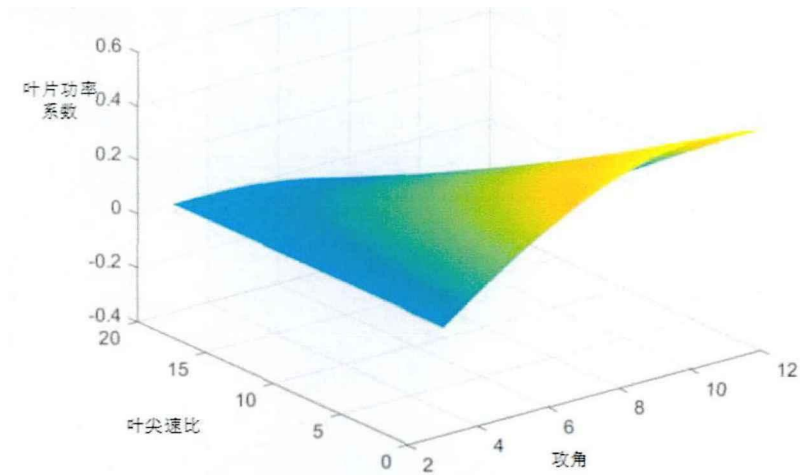


图 2-2 风力机叶片功率系数三维图

2.1.2 风力机功率控制

双馈异步风力发电机组通过气动-机械-电气能量转换实现风能捕获，其核心控制目标为：在额定风速以下最大化能量捕获效率，在额定风速以上维持输出功率稳定，并在极端工况下保护机组安全。根据贝兹理论，风力机捕获的机械功率 P_M 可表述为：

$$P_M = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_p^3 C_p(\lambda, \alpha) \quad (2-4)$$

式中 ρ —— 空气密度（标准工况取 $1.225\text{kg} / \text{m}^3$ ）；
 α —— 攻角（度）；

对于双馈机组，机械转矩 T_M 需考虑齿轮箱传动比 k 的影响：

$$T_M = k \frac{P_M}{\omega_r} = \frac{P_M}{\omega_B} \tag{2-5}$$

在实际风力发电机组运行中，风速变化会触发四种典型工作模式。当自然风力低于机组启动阈值，此时叶片产生的升力不足以克服系统阻力，机组处于待机状态。一旦风速超过切入风速，控制系统立即激活最大功率跟踪（MPPT）模式——此时调节机构会将叶片攻角精确锁定在最佳角度 α ，确保在额定风速前的所有工况下都能实现最大风能捕获。这阶段的能量转换规律具有显著特征：如式（2-4）所示，当忽略风速对 C_p 值的影响时，机械功率输出与风速的三次方呈正比关系，这种非线性增长特性对电网调度有重要影响。

当风速突破额定值但仍在安全范围（切出风速以下），系统自动切换至恒功率控制阶段。此时变桨距机构开始动态调节，通过实时改变叶片迎风角度，将输出功率稳定在额定水平。这种控制策略既能保护设备不过载，又能确保发电品质符合并网要求。而当遭遇极端天气导致风速超过切出阈值（通常 25m/s），机组将执行紧急停机程序：所有叶片同步调整至完全顺桨位置，彻底消除气动升力，避免超速旋转造成结构损伤。

在建立数学模型时，通常将系统拆解为智能控制单元和动力传动单元两大模块。前者基于实时风速、转速等参数，通过叶尖速比 λ 和攻角 β 的动态计算确定 C_p 值；后者则根据该系数推算机械功率及转矩，并将能量传递至发电机系统。

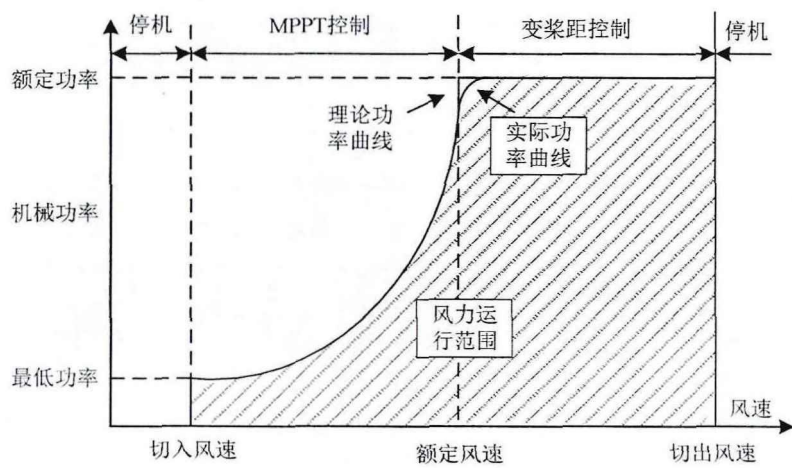


图 2-3 MPPT 控制策略

而且，如图 2-3 所示的三段式功率曲线：在切入前、额定至切出区间、以及超切出风速时，机械功率均维持恒定值。只有在切入与额定风速之间，才需

要根据式(2-3)进行动态计算——这种特性显著简化了控制系统的设计复杂度。图中关键参数定义： v_{cutin} 为启动阈值， v_{rated} 代表额定风速， v_{cutout} 是安全上限，三者共同构成风力机运行的安全边界。

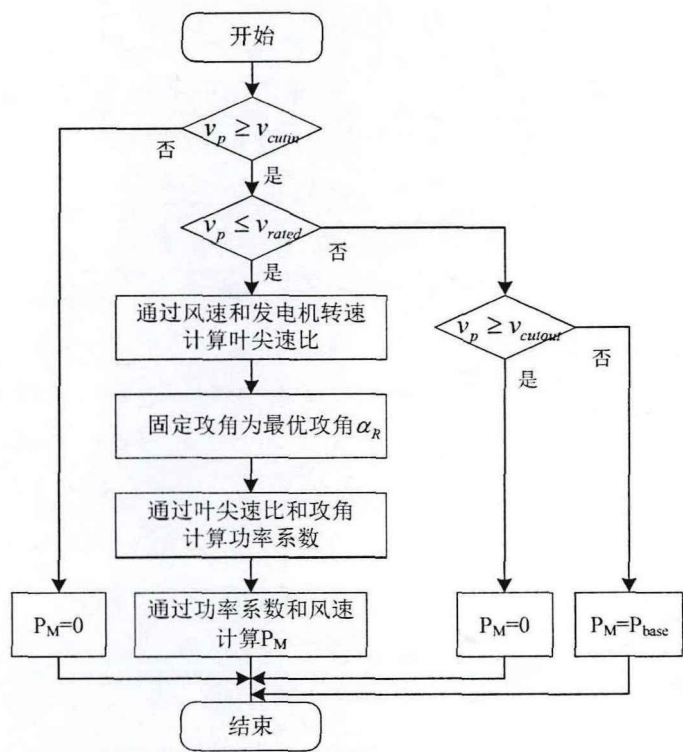


图 2-4 风力机控制流程图

2.2 发电机部分

2.2.1 电磁耦合部分

双馈异步风力发电机与传统同步发电机的核心区别主要体现在电磁耦合和转子力矩上。下面将对电磁耦合部分进行阐述。

双馈异步风力发电机的完整模型是，双馈异步发电机的定子绕组直接接入电网，而转子侧通过背靠背变流器实现交流励磁，允许转子电流的频率和幅值动态调节，从而在变速条件下维持定子输出电压与电网频率同步。转差率是其关键特征，定义为转子转速与同步速的差异百分比：

$$s = \frac{\omega_{syn} - \omega_r}{\omega_{syn}} \tag{2-6}$$

式中 s —— 转子转速与同步速的差异百分比；
 ω_{syn} —— 同步角速度 (rad/s)；

ω_r —— 转子角速度 (rad/s)。

双馈发电机通过控制转差率实现宽转速范围内的高效能量转换。相比之下,传统同步发电机的转子转速必须严格等于同步速($s=0$),无法适应变速运行场景。

在数学模型方面,双馈异步发电机的动态方程通常基于坐标变换简化。定子侧方程可采用静止坐标系(abc 轴)或同步旋转坐标系(dq 轴)描述,而转子侧方程则固定在旋转的 dq 轴上。在定子采用 abc 轴时,电压方程可表示为:

$$u_{s,abc} = R_s i_{s,abc} + \frac{d\psi_{s,abc}}{dt} \quad (2-7)$$

在转子采用 abc 轴时,电压方程可表示为:

$$u_{r,abc} = R_r i_{r,abc} + \frac{d\psi_{r,abc}}{dt} \quad (2-8)$$

定转子间的互感矩阵 $L_{sr}(\theta_r)$ 随转子位置 $\theta_r = P\omega_r t$ 变化,具体形式为:

$$L_{sr}(\theta_r) = L_m \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

通常而言,双馈异步风力发电机使用坐标系时多用下面两种形式:定子侧方程可采用静止坐标系($\alpha\beta$ 轴)或同步旋转坐标系(dq 轴)描述,而转子侧方程则固定在旋转的 dq 轴上。例如,在定子采用 $\alpha\beta$ 轴时,电压方程可表示为:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (2-10)$$

式中 $u_{s\alpha}$ —— 在 α 轴上定子电压 (V/KV);

$u_{s\beta}$ —— 在 β 轴上定子电压 (V/KV)。

$i_{s\alpha}$ —— 在 α 轴上定子电流 (A);

$i_{s\beta}$ —— 在 β 轴上定子电流 (A);

$\psi_{s\alpha}$ —— 在 α 轴上定子侧磁链 (Wb);

$\psi_{s\beta}$ —— 在 β 轴上定子侧磁链 (Wb);

R_s —— 定子侧电阻 (欧姆);

转子侧方程则为:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - \omega_{slip} \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + \omega_{slip} \psi_{rd} \end{cases} \quad (2-11)$$

式中 $\omega_{slip} = s\omega_{syn}$ —— 转差频率 (rad/s);

实际应用中, 为简化分析, 常将定子侧也转换到同步旋转的 dq 坐标系, 此时定转子方程均以 dq 轴表示, 但仍需通过转差率体现转速差异。因此, 模型中是否包含 $\alpha\beta$ 轴取决于具体建模需求, 文献中常见全 dq 轴形式以统一坐标系, 即:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_{slip} \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_{slip} \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_{slip} - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_{slip} - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (2-12)$$

式中 R_r —— 转子侧电阻 (欧姆);

其中磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = (L_{sl} + L_m) i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = (L_{sl} + L_m) i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + (L_{rl} + L_m) i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + (L_{rl} + L_m) i_{rq} \end{cases} \quad (2-13)$$

式中 L_{sl} —— 定子侧漏感 (H);

L_{rl} —— 转子侧漏感 (H);

L_m —— 励磁电感 (H);

双馈异步风力发电机模型的外部网络结构公式如下:

$$u_{dq}(t) = -r_{eq}(t) i_{dq}(t) + e_h(t) \quad (2-14)$$

利用节点电压法计算时, 可将公式转换为诺顿模型, 公式如下:

$$\begin{aligned} i_{dq}(t) &= i_{hgen}(t) - Y_{eq} u_{dq}(t) \\ Y_{eq}(t) &= [r_{eq}(t)]^{-1}, i_{hgen}(t) = Y_{eq}(t) e_h(t) \end{aligned} \quad (2-15)$$

在搭建双馈异步风力发电系统的 MATLAB 仿真模型时, 采用诺顿等效电路方法会面临显著的计算挑战。具体实施过程中, 每个仿真步长都需要动态构建电网节点导纳矩阵: 首先根据上一时刻的电压电流参数计算历史电流源, 再

基于更新的系统参数生成当前时刻的导纳矩阵。这一过程涉及复杂的矩阵运算，特别是将双馈发电机的动态阻抗模型与电网其他元件导纳进行集成时，需要进行矩阵求逆运算形成完整的网络导纳矩阵。

这种建模方式对计算资源提出了极高要求。以典型双馈机组为例，每台需建立包含多个电气节点的详细模型，整体电网导纳矩阵维度将随着机组数量呈几何级数增长。虽然 MATLAB 具备高效的矩阵运算库，但实时处理高阶稠密矩阵求逆仍会导致计算耗时剧增，严重制约仿真效率。特别是在模拟包含数十台机组的大型风电场时，传统方法需要反复处理数百阶矩阵的求逆运算，这对常规计算机的运算能力和内存容量都是严峻考验^[54-55]。

为突破这一技术瓶颈，本文第三章创新性地提出了基于转子角速度遴选的恒导纳建模策略，因为第三章会进行详细的理论推导与实现细节的阐述，所以这里进行简单的概括：

该方法的核心在于通过引入动态补偿机制，将时变的发电机导纳特性转化为恒导纳模型。在预处理阶段预先计算补偿系数，构建等效恒导纳网络架构。这种改进使得仿真过程中无需实时进行矩阵求逆操作，大幅简化了计算流程。实际在 MATLAB 环境中验证表明，改进后的建模方法能有效将计算复杂度降低一个数量级，显著提升大规模风电场仿真的可行性。

从实现机理分析，该方法利用了双馈异步发电机电磁特性的可补偿性。通过动态滑动阻抗补偿技术，将转子侧换流器的动态响应等效为线性时不变系统。这种处理不仅维持了模型的物理保真度，更使得电网导纳矩阵在仿真全程保持恒定特性。相较于传统方法每个步长都需要重构导纳矩阵的计算模式，改进方案仅在初始化阶段完成一次矩阵求逆预处理，后续仿真步长仅需进行简单的线性方程求解，这对缩短计算时间具有决定性意义，相关理论推导和实现细节将在后续章节系统阐述。

2.2.2 机械力矩部分

在构建双馈异步风力发电机组的 MATLAB 仿真模型时，机械系统动态特性直接影响着整体仿真精度。前一节已详细推导了发电机电磁系统的小步长建模方法，本节将重点解析其机械传动链的动态方程。区别于永磁直驱机型，双馈系统特有的齿轮箱结构使得机械能传递过程呈现独特动态特性。

当风力机捕获的机械功率经过传动系统时，需考虑齿轮箱的转矩转换作用。该机械转矩驱动发电机转子旋转，通过电磁感应作用在定转子绕组中产生交变电流，从而实现机电能量转换，描述这一物理过程的核心是转子运动方程：

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_m - T_e - D\omega_r) \quad (2-16)$$

式中 J ——转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

D ——机械阻尼系数 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$);

T_m ——风力机输入的机械转矩;

T_e ——为电磁转矩;

在 dq 坐标系下,DFIG 的电磁转矩由定子磁链与转子电流的相互作用产生。忽略磁路饱和及铁损,电磁转矩表达式为:

$$\begin{cases} T_{ed} = \frac{1}{2}P(L_m i_{sq} + (L_{rl} + L_m)i_{rq})i_{rd} \\ T_{eq} = -\frac{1}{2}P(L_m i_{sd} + (L_{rl} + L_m)i_{rd})i_{rq} \end{cases} \quad (2-17)$$

式中 P ——极对数;

整理得:

$$T_e = T_{ed} + T_{eq} = \frac{P}{2}L_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \quad (2-18)$$

2.2.3 MATLAB 仿真实现

在搭建双馈风力发电机组的动态模型时,整个仿真流程从捕捉风能开始逐步展开。当自然风速吹动叶片旋转时,气动模型会实时计算出捕获的机械功率,这个过程中需要结合叶片特性曲线和实时环境参数。机械功率通过传动轴传递时,齿轮箱将低速轴的高转矩转化为适合发电机运行的高速旋转。

动力传递到发电机侧后,转子的旋转运动与定子磁场相互作用产生电磁效应。此时机械系统与电气系统开始紧密耦合——转子的实际转速会影响绕组中的感应电流,而电流变化又反过来产生电磁转矩作用于转子。描述这种机电交互的核心在于转子运动方程,需要同时考虑传动系统的惯量折算和能量损耗特性。建模时需特别注意双馈机组特有的运行特性。转子的转速并非固定不变,而是允许在同步速上下波动,这种灵活性使得控制系统能够通过调节转子电流来优化能量转换效率。在 MATLAB 中实现这一动态过程时,通常会将机械方程与电磁方程分开建模,再通过数据总线进行实时交互。

仿真架构的搭建需要分层处理不同物理域模型。最上层的气动模块接收风速输入并输出机械转矩,中间层的齿轮箱模型进行转速转换,底层的发电机模型则处理电磁转换与并网交互。各模块之间通过信号线传递转速、转矩、电流

等关键参数，形成闭环的动态响应系统。

实际编程实现中，常会采用模块化设计思路。将复杂的微分方程拆解为独立的函数模块，通过 MATLAB 的 Simulink 环境进行可视化连接。例如使用查表模块存储气动参数曲线，通过函数回调实现转子运动方程的实时求解，借助电气元件库搭建双馈发电机的等效电路模型。

为了保证仿真精度与速度的平衡，需要合理配置求解器参数。针对机电系统存在的刚性特性问题，通常会选择变步长求解算法来自动调整积分步长。同时采用矩阵预计算、参数持久化存储等技术优化运算效率，特别是在处理大规模风电场模型时，这类优化手段能显著提升计算性能。

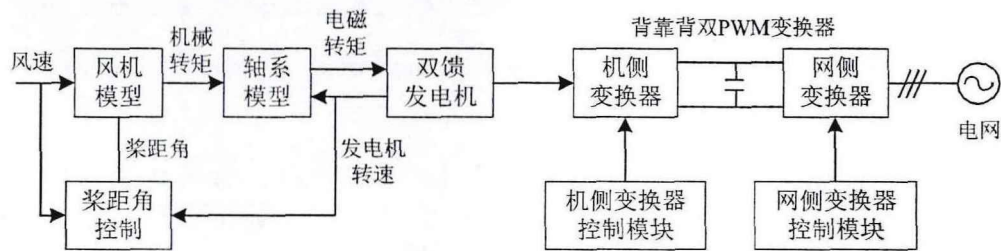


图 2-5 完整 DFIG 控制流程图

2.3 换流器部分

在电力电子系统电磁暂态仿真研究中，器件建模始终是决定仿真质量的核心环节。针对传统离线仿真场景，工程领域普遍采用双值电阻模型进行电力电子器件表征。该模型优势在于能够实现较高的仿真准确度，但其计算量庞大的固有特性导致实时仿真效率显著降低，这成为实际应用中的主要瓶颈。

当前主流的商业化实时仿真解决方案多采用恒导纳建模策略，其本质是通过恒定导纳参数来模拟开关器件的动态特性。这种建模方式的最大优势在于显著降低了电磁暂态问题的求解复杂度：由于支路导纳保持稳定，系统方程组的数值求解过程变得异常高效。然而，我们在 MATLAB 仿真实践中发现，当面对开关动作频繁的电力电子系统时，该模型会暴露明显的精度缺陷。具体表现为两个方面：首先是仿真波形中反复出现的数值振荡现象，其次是难以消除的虚拟功率损耗问题。

已有研究主要聚焦于数值积分方法的改进，这种思路虽然能够加速数值振荡的衰减进程，但对解决虚拟功率损耗问题的帮助十分有限。更值得关注的是，现有的补偿策略和初始化方案都基于理想化假设条件，未能充分考虑实际仿真环境中的复杂影响因素，这在很大程度上制约了模型的适用范围。

此外，受器件开关过程中应力限制的影响，风力机的容量越大，VSC 的开

关频率通常越低。对于 2-3MW 的风力发电机组,开关频率一般在 2-3kHz 之间,最高不超过 5kHz。这种开关频率可以通过引入电阻的伴随离散电路(Associated Discrete Circuit, ADC)模型进行仿真。然而,ADC 模型是通过隐式梯形积分算法离散得到的恒导纳模型,虽然隐式梯形积分算法的截断误差较小,能够使等效电路更好地反映储能元件的电气特性,但该数值方法无法为差分电路提供阻尼,在状态量突变时可能引发数值振荡。使用此方法建立的恒导纳模型在开关切换后会产生持续的数值振荡,严重影响仿真精度。针对这一问题,RTDS 小步长元件库中的电力电子器件恒导纳模型通过在电容支路串联电阻的方式来衰减振荡。然而,由于衰减数值振荡的方法会引入额外的阻尼,以及恒导纳模型中储能元件的影响,导致目前恒导纳模型的虚拟功率损耗问题较为严重,进而影响仿真精度。因此,改进为负阻抗补偿的恒导纳模型,而负阻抗在开关频率增加时,虚拟损耗呈现增长趋势。

电力电子器件建模是电力电子系统电磁暂态仿真的关键技术,对于离线电磁暂态仿真,电力电子器件大多采用双值电阻模型,其仿真精度较高但仿真效率较低,无法应用于实时仿真。目前,商业化实时仿真平台大多采用恒导纳模型模拟电力电子器件的开关特性,恒导纳模型支路导纳恒定的特点使电磁暂态求解变得简单高效,但恒导纳模型自身的物理性质使得模型在开关动作频繁的电力电子系统仿真中精度性能较差,表现为数值振荡现象和虚拟功率损耗问题。当前针对恒导纳建模问题的研究大多关注其采用的数值积分方法,旨在加速数值振荡衰减,但对于降低虚拟功率损耗的作用很小。另外,目前常采用的补偿策略和初始化策略等均忽略了离线电磁暂态仿真中插值算法的作用效果,采用理想假设条件,限制了模型的应用场景。本章节将进行恒导纳模型和负阻抗补偿的恒导纳模型的描述,在第四章将详细进行滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型的表述。

2.3.1 恒导纳模型基本原理

如图 2-5 所示,发电机的转子通过背靠背连接的换流器实现耦合,这种配置通常称为背靠背换流器结构。在整流端和逆变端,分别配置了平波电抗器,同时在直流侧并联电容器以维持电压的稳定性。电力电子变换器的建模方法主要包括详细模型、开关函数模型和平均模型等。详细模型可进一步分为双值电阻法和 LC 等效法,其中双值电阻法主要用于 PSCAD/EMTDC 等离线仿真工具中,用于模拟开关的导通与关断状态。由于传统电力电子变换器建模方法的支路参数会随着开关状态的变化而变化,在使用节点电压法计算电磁暂态方程时,

每个时间步长都需要对导纳矩阵进行求逆，导致计算量较大。因此，在小步长仿真中，通常采用恒导纳思想来简化变换器的建模过程^[56-57]。

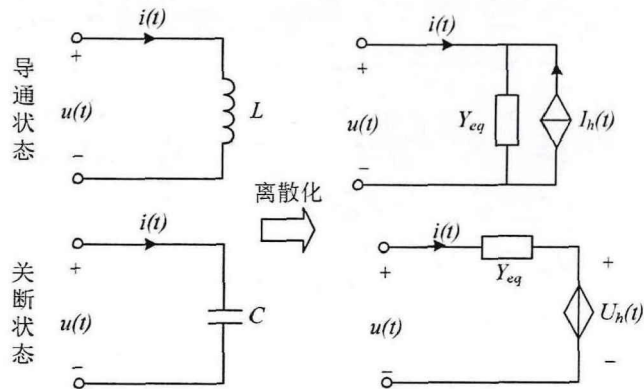


图 2-6 恒导纳模型

$$\begin{cases} Y_{eq_T} = \frac{\Delta t}{2L} = \frac{2C}{\Delta t} \\ I_{h_T} = \begin{cases} -i(t-\Delta t) - Y_{eq_T}u(t-\Delta t) \\ i(t-\Delta t) + Y_{eq_T}u(t-\Delta t) \end{cases} \\ U_{h_T}(t) = I_{h_T}(t) / Y_{eq_T} \end{cases} \quad (2-19)$$

式中 Δt —— 仿真步长；
 T —— 隐式梯形法；

针对数值振荡问题，RTDS 小步长元件库中的电力电子器件恒导纳模型通过在电容支路串联电阻的方式来衰减振荡，如图 2-6 所示，是目前广泛应用的一种建模方法。

针对实时数字仿真中的数值振荡，工程领域广泛采用基于恒导纳特性的建模解决方案。该方法的物理机理清晰可辨：通过在电容支路策略性地串入阻尼电阻，既维持了电容元件的基本电气特性，又构建了高频振荡的衰减通道。

这种建模方式的工程价值体现在多维度的技术融合上。其恒导纳特性确保仿真过程中参数稳定，规避了变导纳模型迭代计算带来的收敛风险；阻尼电阻的配置更在保持系统动态响应的同时，赋予模型更强的数值适应能力。在电力电子装置快速切换的工况下，该模型能够有效消除仿真波形中的高频毛刺。

相较于传统抑制手段，这种建模策略展现出独特的应用优势。不需要增加额外滤波环节或修改核心算法，仅通过电路拓扑的优化设计就能实现系统稳定。

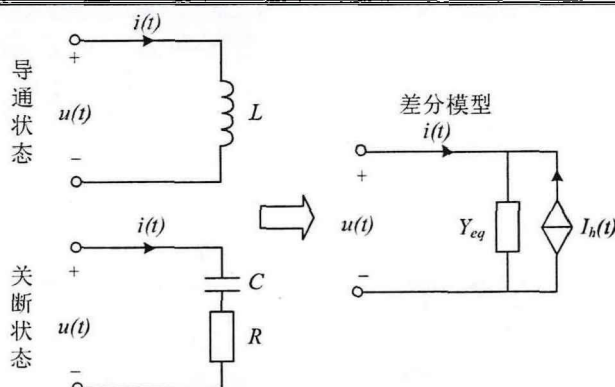


图 2-7 RTDS 恒导纳模型

在实时数字仿真系统的建模实践中，RTDS 恒导纳模型展现出独特的电路等效特性。当电力电子器件处于导通工况时，其电磁行为可等效为纯电感支路，这种表征方式能准确反映导通状态下的电流连续特性；而在关断状态下，模型则转化为电容与电阻的串联拓扑结构，这种组合既表征了器件关断时的储能特性，也为系统提供了必要的阻尼支撑。

与核心算法框架相协调，该模型同样采用隐式梯形积分法进行数值离散化处理。通过数学变换，原始微分方程被转化为等效电导与等效电流源并联的诺顿电路形式。这种处理方式具有双重技术优势：一方面保证了数值计算的绝对稳定，另一方面实现了复杂电磁过程的网络化表征。具体的等效电路参数表达式详见图 2-7，其推导过程严格遵循能量守恒与电荷平衡的基本定律^[58-59]。

模型结构中的电感、电容及电阻参数具有复合效应。这些参数不仅决定了仿真系统的数值稳定性阈值，更直接关系到模型对实际电磁暂态过程的再现精度。其中电感参数影响开关瞬态的电抗特性，电容值关联器件关断时的电压建立速度，而阻尼电阻则调节着系统的高频响应特性。为有效控制虚拟功率损耗带来的仿真误差，各元件参数必须严格遵循式 2-20 所示的约束条件。这种约束关系本质上是通过能量等效原理，确保离散化模型与连续系统在电荷传输特性上保持动态平衡^[60]。

$$\begin{cases} Y_{eq} = \frac{\Delta t}{2L} = 1 / (R + \frac{\Delta t}{2C}) \\ I_h(t) = \begin{cases} -i(t - \Delta t) - Y_{eq}u(t - \Delta t) \\ (1 - 2RY_{eq})i(t - \Delta t) + Y_{eq}u(t - \Delta t) \end{cases} \end{cases} \quad (2-20)$$

$$\begin{cases} L = \frac{\sqrt{2}(\Delta t F)U}{I} \\ C = \frac{(\Delta t F)^2}{L} \\ R = \frac{2L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2C} \\ F = \frac{1}{2(\sqrt{\delta^2 + 1} - \delta)} \end{cases} \quad (2-21)$$

式中 U —— 额定开关电压；

I —— 额定开关电流；

δ —— 阻尼系数，典型值为 0.9。

另一种衰减震荡的方法是利用收敛性较强的其他数值积分算法替代隐式梯形积分算法，如后退欧拉法。后退欧拉积分算法下，图 2-6 中等效电路的参数如下式所示。

$$\begin{cases} Y_{eq_B} = \frac{\Delta t}{L} = \frac{C}{\Delta t} \\ I_{h_B}(t) = \begin{cases} -i(t - \Delta t) \\ Y_{eq_B} u(t - \Delta t) \end{cases} \\ U_{h_B}(t) = I_{h_B}(t) / Y_{eq_B} \end{cases} \quad (2-22)$$

在抑制数值振荡的多种技术途径中，算法层面的优化方案展现出独特的理论价值。相较于传统隐式梯形积分法，后退欧拉算法因其更强的数值收敛特性受到工程界关注。该方法的核心机理在于通过调整积分运算的相位延迟特性，在离散化过程中自然引入数值阻尼效应。这种算法转换不仅避免了硬件电路的拓扑修改，更从数学本质上改善了系统方程的刚性特征。

这种算法替代策略在特定应用场景具有显著优势。当系统存在快速切换的电力电子器件时，后退欧拉法的一阶精度特性可有效抑制开关瞬态引起的数值震颤。其无条件稳定特性尤其适用于包含多重时间尺度的复杂系统仿真，即便在较大步长条件下仍能保持波形光滑。但这种方法的局限性同样值得注意，相位滞后效应可能导致高频动态响应的幅值衰减，需通过参数补偿机制进行校正。

2.3.2 基于负阻抗补偿的恒导纳模型

在数值仿真算法选择上，后退欧拉法展现出独特的工程适应性。与经典的梯形积分法相比，这种方法计算稳定性更好，方程收敛速度更快；虽然精度稍

逊于高阶积分算法，但胜在迭代过程简洁直观——这对需要高频次计算的电力电子系统仿真尤为关键。正是基于这些特性，本研究最终选定后退欧拉法作为差分模型的核心算法。

由于算法本身具备更强的误差衰减能力，传统模型中用于抑制振荡的附加电阻（如图 2-7 所示）便不再必要。这不仅简化了电路拓扑结构，更避免了电阻元件引入的额外功率损耗。但是算法转换造成的虚拟功率偏差需要创新性补偿方案。

既然常规电阻会吸收能量产生损耗，尝试引入能释放能量的负电阻元件，实际建模时，重点考察了开关器件的工作特性。当器件处于关断状态时，支路电流自然趋近于零，此时无需额外补偿；而在导通工况下，通过在等效电感支路串联负电阻（如图 2-8 所示），恰好能抵消算法转换产生的虚拟功率缺口。这种精准的工况适配设计，既维持了模型动态响应的真实性，又实现了能量收支的精细平衡。

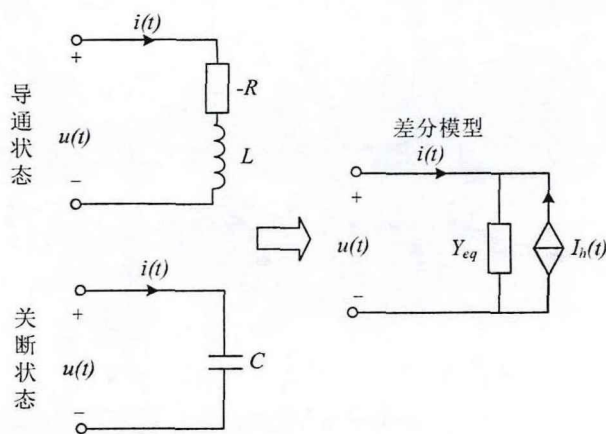


图 2-8 基于负电阻补偿的恒导纳模型

后退欧拉积分算法下负电阻补偿模型的差分电路等效参数满足式(2-23)。

$$\begin{cases} Y_{eq} = 1 / (\frac{L}{\Delta t} - R) = \frac{C}{\Delta t} \\ I_h(t) = \begin{cases} -(1 + RY_{eq})i(t - \Delta t) \\ Y_{eq}u(t - \Delta t) \end{cases} \end{cases} \quad (2-23)$$

而负阻抗补偿的效果也是有限的，随着开关频率的升高，虚拟损耗仍有增长趋势。

2.4 本章小结

本章在 MATLAB 环境下搭建了双馈异步风力发电机的数学模型，其中包

括风力机、发电机、换流器三大部分。

首先建立风力机气动模型，明确叶轮半径、空气密度、最大功率系数等核心参数的计算方法。采用最佳叶尖速比跟踪策略实现最大功率点追踪(MPPT)，通过 Matlab/Simulink 构建风速-机械功率传递链。仿真验证了风速波动下桨距角的动态调节特性，确保输出功率平滑跟随风速变化。

然后推导定转子绕组在旋转坐标系下的电压方程与磁链方程，建立电磁耦合数学模型，构建电磁转矩与机械转矩的动态平衡关系，在 Matlab 中搭建了机电耦合的仿真模型。

最后阐述换流器恒导纳控制基本原理，针对电网阻抗波动问题，引入负阻抗补偿机制，抵消线路阻抗对系统稳定性的影响，基于理论分析构建导纳补偿控制框架，重点阐明补偿量计算与动态调整逻辑。

第 3 章 发电机恒导纳模型

本章主要针对 DFIG 的恒导纳模型进行推导，首先对发电机模型的整理，整理出时变时不变导纳矩阵，分析时变导纳矩阵的时变项，基于遴选机制建立恒导纳模型，再对模型进行误差分析，最后基于提出的建模方法对模型的影响进行论述。具体的推导过程与分析方法由下面小节给出。

3.1 整理发电机模型

前面的章节已经介绍过双馈异步风力发电机的电压磁链方程，电压方程如下：

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_{slip} \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_{slip} \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_{slip} - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_{slip} - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (3-1)$$

磁链方程如下：

$$\begin{cases} \psi_{sd} = (L_{sl} + L_m) i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = (L_{sl} + L_m) i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + (L_{rl} + L_m) i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + (L_{rl} + L_m) i_{rq} \end{cases} \quad (3-2)$$

双馈异步风力发电机的基本数学模型已由式(3-1)和式(3-2)完整描述。但在实施小步长离散化的电磁暂态数值计算过程中，必须对这些微分方程进行适当处理。这里需要引入后向欧拉法这种数值积分方法，通过其特有的隐式迭代格式，原本连续的微分方程得以转化为适用于仿真的离散化电压-电流表达式。

后向欧拉法将当前时刻的导数值与下一时间步长的量值建立关联，这种隐式处理方式不仅保证了计算格式的数值稳定性，还能有效应对风电机组功率快速波动引发的复杂暂态过程。完成这一转化步骤后，发电机模型才能与电力网络中的其他元件建立精确的数值耦合，实现整个系统电磁暂态过程的协同仿真。该方法特有的绝对稳定特性对于处理风电并网系统中常见的刚性微分问题具有

独特优势，这为高精度仿真提供了坚实的算法基础：

$$y'(x_{i+1}) = \frac{y(x_{i+1}) - y(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3-3)$$

采用后向欧拉法对电压方程进行离散化，时间步长为 Δt ，以 d 轴为例，将磁链方程代入电压方程：

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} [(L_{sl} + L_m) i_{sd} + L_m i_{rd}] - \omega_{slip} [(L_{sl} + L_m) i_{sq} + L_m i_{rq}] \quad (3-4)$$

利用后退欧拉法整理得到：

$$u_{sd} = (R_s + \frac{L_{sd}}{\Delta t}) i_{sd} + \frac{L_m}{\Delta t} i_{rd} - \frac{\psi_{sd}(t - \Delta t)}{\Delta t} - \omega_{slip} L_{sq} i_{sq} - \omega_{slip} L_m i_{rq} \quad (3-5)$$

式中 $L_{sd} = L_{sl} + L_m$, $L_{sq} = L_{sl} + L_m$;

同理，q 轴整理后为：

$$u_{sq} = (R_s + \frac{L_{sq}}{\Delta t}) i_{sq} + \frac{L_m}{\Delta t} i_{rq} - \frac{\psi_{sq}(t - \Delta t)}{\Delta t} - \omega_{slip} L_{sd} i_{sd} - \omega_{slip} L_m i_{rd} \quad (3-6)$$

转子侧将磁链代入电压方程以 d 轴为例：

$$u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} [L_m i_{sd} + (L_{rl} + L_m) i_{rd}] - (\omega_{slip} - \omega_r) [L_m i_{sq} + (L_{rl} + L_m) i_{rq}] \quad (3-7)$$

利用后退欧拉法整理得到：

$$u_{rd} = (R_r + \frac{L_{rd}}{\Delta t}) i_{rd} + \frac{L_m}{\Delta t} i_{sd} - \frac{\psi_{rd}(t - \Delta t)}{\Delta t} - (\omega_{slip} - \omega_r) [L_m i_{sq} + L_{rd} i_{rq}] \quad (3-8)$$

同理，q 轴整理后为：

$$u_{rq} = (R_r + \frac{L_{rq}}{\Delta t}) i_{rq} + \frac{L_m}{\Delta t} i_{sq} - \frac{\psi_{rq}(t - \Delta t)}{\Delta t} - (\omega_{slip} - \omega_r) [L_m i_{sd} + L_{rq} i_{rd}] \quad (3-9)$$

式中 $L_{rd} = L_{rl} + L_m$, $L_{rq} = L_{rl} + L_m$;

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{L_{sd}}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_{sq} & \frac{L_m}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_m \\ -\omega_{slip} L_{sd} & R_s + \frac{L_{sq}}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_m & \frac{L_m}{\Delta t} \\ \frac{L_m}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_m & R_r + \frac{L_{rd}}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_{rd} \\ -(\omega_{slip} - \omega_r) L_m & \frac{L_m}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_{rq} & R_r + \frac{L_{rq}}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{dsh}(t - \Delta t) \\ e_{qsh}(t - \Delta t) \\ e_{drh}(t - \Delta t) \\ e_{qrh}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

式中 $e_{dsh}(t - \Delta t)$ —— 定子 d 轴电压历史项；

$e_{qsh}(t - \Delta t)$ —— 定子 q 轴电压历史项；

$e_{drh}(t - \Delta t)$ —— 转子 d 轴电压历史项；

$e_{qrh}(t - \Delta t)$ —— 转子 q 轴电压历史项

电压历史项包含上一时刻的电流、磁链和交叉耦合项，而由于风速的不平稳以至于转差率会随时间的变化而变化，这对于导纳模型中的导纳矩阵是不是恒定的有直接关系，所以将阻抗矩阵的时变和时不变部分分离：

$$\text{时不变部分: } \begin{bmatrix} R_s + \frac{L_{sd}}{\Delta t} & 0 & \frac{L_m}{\Delta t} & 0 \\ 0 & R_s + \frac{L_{sq}}{\Delta t} & 0 & \frac{L_m}{\Delta t} \\ \frac{L_m}{\Delta t} & 0 & R_r + \frac{L_{rd}}{\Delta t} & 0 \\ 0 & \frac{L_m}{\Delta t} & 0 & R_r + \frac{L_{rq}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$$\text{时变部分: } \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{slip} L_{sq} & 0 & -\omega_{slip} L_m \\ -\omega_{slip} L_{sd} & 0 & -\omega_{slip} L_m & 0 \\ 0 & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_m & 0 & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_{rd} \\ -(\omega_{slip} - \omega_r) L_m & 0 & -(\omega_{slip} - \omega_r) L_{rq} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

时变部分整理为：

$$\begin{bmatrix} 0 & -(\omega_{syn} - \omega_r) L_{sq} & 0 & -(\omega_{syn} - \omega_r) L_m \\ -(\omega_{syn} - \omega_r) L_{sd} & 0 & -(\omega_{syn} - \omega_r) L_m & 0 \\ 0 & -(\omega_{syn} - 2\omega_r) L_m & 0 & -(\omega_{syn} - 2\omega_r) L_{rd} \\ -(\omega_{syn} - 2\omega_r) L_m & 0 & -(\omega_{syn} - 2\omega_r) L_{rq} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

进一步整理时变部分和时不变部分：

$$\text{时变部分: } Y_{eqvar} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_r L_{sq} & 0 & \omega_r L_m \\ \omega_r L_{sd} & 0 & \omega_r L_m & 0 \\ 0 & 2\omega_r L_m & 0 & 2\omega_r L_{rd} \\ 2\omega_r L_m & 0 & 2\omega_r L_{rq} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

$$\text{时不变部分: } Y_{eqcomp} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{L_{sd}}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_{sq} & \frac{L_m}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_m \\ -\omega_{syn} L_{sd} & R_s + \frac{L_{sq}}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_m & \frac{L_m}{\Delta t} \\ \frac{L_m}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_m & R_r + \frac{L_{rd}}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_{rd} \\ -\omega_{syn} L_m & \frac{L_m}{\Delta t} & -\omega_{syn} L_{rq} & R_r + \frac{L_{rq}}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

可以观察得到，时变部分主要由转子角速度的时变特性决定，而转子角速度由风力机输入的机械功率有关，所以下一节基于本结论搭建模型。

3.2 基于遴选设计的恒导纳模型研究

从上一节可以看到，转子角速度决定了电压方程阻抗模型的时变部分，而转子角速度又和输入的机械功率有关，输入的机械功率越大转子角速度越大。在风速波动的情况下，导纳矩阵就会随着转子角速度的变化而变化，因此，本小节对转子角速度进行遴选设计，将连续问题分散化，在转子角速度在规定的范围内的时候，进行特定导纳矩阵的调用。在计算量上，没有直接用同一个恒导纳模型的计算量要小，但是根据转子角速度的大取值范围分出小的取值范围，从小的取值范围遴选出代表小范围的代表值，能够更好的适配于风速波动的场景，误差要比它好得多，且能够进行特定转子角速度下导纳矩阵的预处理，从而减少在计算过程中的资源消耗，更加适用于工程。

首先根据机械最低功率和机械额定功率确定转子角速度的全局范围：

$$\omega_r \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}] \quad (3-16)$$

最小转子角速度对应于切入风速下的最低机械功率：

$$P_{\min} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{\min}^3 C_p(\lambda, \alpha) \quad (3-17)$$

同理，最大转子角速度对应于额定机械功率：

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{\text{rate}}^3 C_p(\lambda, \alpha) \quad (3-18)$$

在风速和最优减速比为输入量的情况下，得到对应的转子角速度的取值范围，从而得到对应的机械功率。

额定功率范围内，对应的转子角速度较高，接近于同步转速，转差率较小，时变项中系数较大，需要更密集分层以控制误差；最低功率范围，对应的转子角速度较小，转差率较大，但电流幅值较小，可适当放宽分层密度，但需验证误差是否在可接受范围。例如在额定机械功率范围内转子角速度为(0.8,1.0]（标么值），初始分层为三层，若误差越限则细分为6层；在最低机械功率范围内，转子角速度为[0.2,0.4]，动态调整为4层。

对于每个子区间 $[\omega_a, \omega_b]$ ，计算中值代表值利用二分法 $\omega_{r,k} = \frac{\omega_a + \omega_b}{2}$ ，构建近似阻抗矩阵：

$$Z_k = Z_{\text{时不变}} + Z_{\text{时变}(\omega_r, k)} \quad (3-19)$$

式中 k —— 层数；

3.3 遴选设计的恒导纳模型误差分析

将实际转子角速度 ω_r 替换为分层代表值 $\omega_{r,k}$ ，导致阻抗矩阵的近似误差：

$$\Delta Z = Z_{\text{实际}}(\omega_r) - Z_k(\omega_{r,k}) \quad (3-20)$$

其中， Z_k 为分层区间的恒导纳矩阵，由时不变部分和固定 $\omega_{r,k}$ 的部分组成。

定义电压误差 ΔU 为分层区间代表值 $\omega_{r,k}$ 算得电压与实际电压差值，而电压与转子角速度的关系是：在未到额定风速之前，在到切入风速之后，发电机电压随转子角速度的增加而增加，所以选择中间值是合理的，且电压误差可以用 ΔU 来代表电压误差跨度，故：

$$\Delta U = \Delta Z \cdot I_{\text{rate}} = \begin{bmatrix} \Delta\omega_r L_{sq} i_{sq\text{rate}} + \Delta\omega_r L_m i_{rq\text{rate}} \\ \Delta\omega_r L_{sd} i_{sd\text{rate}} + \Delta\omega_r L_m i_{rd\text{rate}} \\ 2\Delta\omega_r L_m i_{sq\text{rate}} + 2\Delta\omega_r L_{rd} i_{rq\text{rate}} \\ 2\Delta\omega_r L_m i_{sd\text{rate}} + 2\Delta\omega_r L_{rq} i_{rd\text{rate}} \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

其中 $\Delta\omega_r = \omega_r - \omega_{r,k}$ ，因为实际电流并不可知，所以按照保守做法，用电流的额定值进行电压误差计算。

计算区间端点 ω_a 和 ω_b 的实际电压误差：

$$\varepsilon_u = \frac{\|\Delta U(\omega_a)\|}{\|U_{\omega_a}\|} \times 100\% \quad (3-22)$$

$$\varepsilon'_u = \frac{\|\Delta U(\omega_b)\|}{\|U_{\omega_b}\|} \times 100\% \quad (3-23)$$

若 $\max(\varepsilon_u, \varepsilon'_u) > k_u\%$ ，将区间二分，递归处理子区间，其中 $k_u\%$ 为电压允许的最大误差值。

定义电流误差跨度为 ΔI ：

$$\Delta I = Z_k^{-1} \Delta U \quad (3-24)$$

计算区间端点 ω_a 和 ω_b 的电流误差：

$$\varepsilon_I = \frac{\|\Delta I(\omega_a)\|}{\|I_{\omega_a}\|} \times 100\% \quad (3-25)$$

$$\varepsilon'_I = \frac{\|\Delta I(\omega_b)\|}{\|I_{\omega_b}\|} \times 100\% \quad (3-26)$$

若 $\max(\varepsilon_I, \varepsilon'_I) > k_I\%$ ，将区间二分，递归处理子区间，其中 $k_I\%$ 为电流允许的最大误差值。

定义功率误差跨度为 ΔP ：

$$\Delta P = U_{\text{rate}}^T \Delta I + \Delta U^T I_{\text{rate}} \quad (3-27)$$

同理得到 $\max(\varepsilon_p, \varepsilon'_p) > k_p \%$ ，将区间二分，递归处理子区间，其中 $k_p \%$ 为功率允许的最大误差值。

在误差计算中引入了额定电压和额定电流，因此得到的分层效果可能过于保守，因此对转子角速度较低的分层，应该用更加宽泛的误差阈值以保证计算效率。

3.4 遴选设计的恒导纳模型的影响

若转子速度越过分层则需要改变双馈异步风力发电机导纳矩阵，从而增加了实时计算的开销，但进行的都是预处理已经算好的矩阵的改变，只需调用预处理的导纳矩阵合并到整个系统的矩阵空间里就可以进行继续仿真，与实时变化的导纳矩阵相比，效率显著提升，下面将从计算效率、实现复杂度、对系统的动态特性等多方面分析它的影响。

3.4.1 遴选设计对计算效率和实现复杂度的影响

传统时变模型中，导纳模型需在每个仿真步长内实时计算并求逆。导纳矩阵计算涉及与 ω_r 相关的耦合项计算，复杂度为 $O(n^2)$ ， n 为矩阵维度，矩阵求逆后复杂度为 $O(n^3)$ ，若总仿真步长为 T ，则总计算复杂度为 $O(T \cdot n^3)$ ，随仿真时长线性增长。

表 3-1 传统时变模型与分层模型时间复杂度对比

操作	传统时变模型	分层模型
单步导纳矩阵计算	$O(n^2)$	$O(1)$
单步矩阵求逆	$O(n^3)$	$O(1)$
单步总计算量	$O(n^3)$	$O(n^2 + \log N)$
长期仿真总计算量	$O(Tn^3)$	$O(T(n^2 + \log N) + 2)$

分层模型通过预处理与实时查表实现效率提升，在预处理阶段，子层划分与导纳矩阵预计算，将 ω_r 的范围划分为 N 个子层，为每层预计算导纳矩阵 Y_k ，及其逆矩阵，时间复杂度为每个子层的矩阵求逆，复杂度为 $O(n^3)$ ，总预处理计算量为 $O(N \cdot n^3)$ ，当电压电流或功率误差超过阈值细分当前子层，单次细分复杂度为 $O(n^3)$ ，而在转速较低时，在误差计算使用额定电流与电压，所以会导致误差过于小而使得分层过多导致计算量爆炸，所以应该在转子转速较低时放宽误差阈值，之后需储存 N 个 $n \times n$ 的矩阵，空间复杂度为 $O(N \cdot n^2)$ ；在实时

仿真阶段，根据当前转速 ω_r 确定所属子层，时间复杂度为 $O(\log N)$ ，直接使用查表所得导纳矩阵进行求解电压等物理量，时间复杂度为 $O(n^2)$ ，单步仿真计算量为 $O(n^2 + \log N)$ 。

3.4.2 遴选设计对系统动态特性的影响

系统特征值（极点）由状态矩阵的特征根决定。导纳矩阵的近似误差会改变状态矩阵的系数，进而影响极点位置。若极点实部（阻尼系数）减小，可能导致振荡模式阻尼不足。导纳矩阵的时变性直接影响电流和电压的暂态响应。分层模型将时变矩阵替换为分段固定矩阵，可能引起阶跃响应超调：若分层导纳矩阵在转速突变时未及时切换，可能导致电压或功率的瞬时超调，也可能引起谐振频率偏移，固定导纳矩阵的谐振频率与真实模型的偏差可能引发非预期振荡；对发电机机电耦合特性中，分层设计通过影响电磁转矩的计算精度，间接改变机电时间常数和动态响应速度。

3.4.3 遴选设计在电力系统中的优势

该方法的优势在于通过分段线性化策略有效降低了时变系统分析的计算复杂度。将转子角速度的取值范围分解为多个相邻子区间后，每个子域内的导纳矩阵得到参考值可视为准静态参数，避免了连续时变特性带来的频繁重计算需求。这种离散化的处理方式不仅显著提升了数值仿真效率，还通过局部线性近似增强了系统稳定性分析的可行性。在工程层面，该方法使得传统频域分析工具能够直接应用于时变场景，为控制器设计与谐振特性评估提供了参数化建模基础。同时，通过合理选择子区间宽度与代表值，可在保证计算精度的前提下实现计算资源的最优分配，尤其适用于大规模风电场群的多时间尺度动态仿真。而且能够使导纳矩阵在小范围内恒定，使得在额定转子角速度下，导纳矩阵是恒定的，减小了计算难度。

3.5 发电机恒导纳模型 MATLAB 实现

双馈异步风力发电机发电机恒导纳数学模型整理总结如下：

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{L_{sd}}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_{sq} & \frac{L_m}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_m \\ -\omega_{slip} L_{sd} & R_s + \frac{L_{sq}}{\Delta t} & -\omega_{slip} L_m & \frac{L_m}{\Delta t} \\ \frac{L_m}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_{rst}) L_m & R_r + \frac{L_{rd}}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_{rst}) L_{rd} \\ -(\omega_{slip} - \omega_{rst}) L_m & \frac{L_m}{\Delta t} & -(\omega_{slip} - \omega_{rst}) L_{rq} & R_r + \frac{L_{rq}}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{dsh}(t - \Delta t) \\ e_{qsh}(t - \Delta t) \\ e_{drh}(t - \Delta t) \\ e_{dsh}(t - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

其中： ω_{rst} 是根据遴选确定的固定转子角速度

由双馈异步风机的发电机恒导纳模型在 MATLAB 中的建模程序如下：

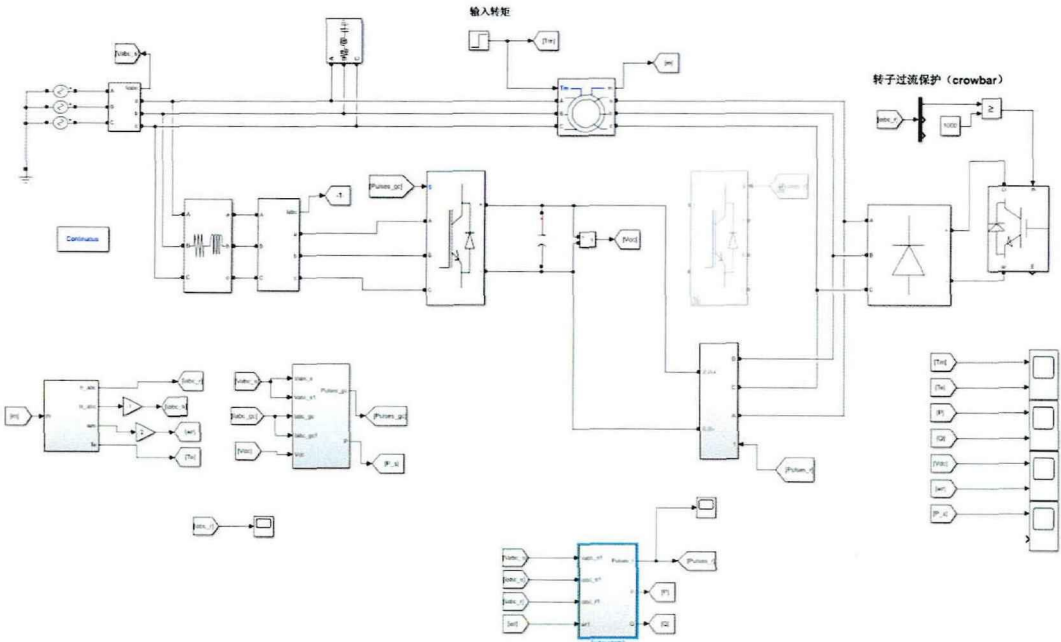


图 3-1 双馈风机恒导纳 MATLAB 总体程序
发电机控制中的转子角速度处理如下：

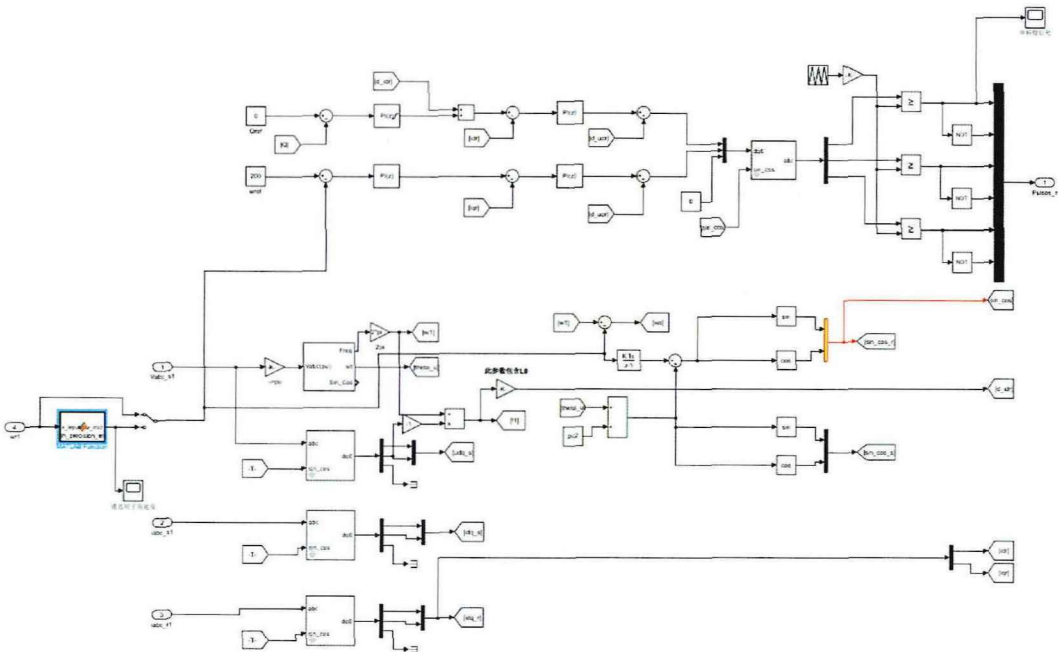


图 3-2 双馈风机发电机转子角速度恒导纳 MATLAB 程序图
其中用图中左侧的 MATLAB function 来进行转子角速度的遴选处理，而 MATLAB function 右侧的开关是为了对比实验，其中的遴选代码逻辑是将转子角速度通过二分法进行分区间，经过误差的限制，从而得到最优区间，存储进

容器后，从第四端口传进来的转子角速度经过挑选，得到对应的数值从而得到转子角速度阶梯型的波形，波形将在第五章给出。

3.6 本章小结

本章提出了一种基于转子角速度遴选机制的双馈异步风力发电机恒导纳建模方法。在上一章节列写双馈风力发电机完整的导纳矩阵方程，在 3.1 节进行了导纳矩阵的整理，分为时变与时不变部分，时变部分是因为转子角速度导致的时变，因此引出 3.2 节的基于转子角速度遴选机制的恒导纳模型的建立，3.3-3.4 节针对所提出的方法进行完善与补充，其中包括误差分析和遴选机制自动选择的切分长度等，遴选机制会对系统的复杂度的正向影响，能够使双馈异步风力发电机模型转化为双馈异步风力恒导纳模型，提升仿真效率，在误差分析中能够控制遴选机制对系统的影响，具体仿真验证将在第五章做详细分析。

第 4 章 基于滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型

本章对 DFIG 的换流器进行恒导纳模型的建模，之后进行参数优化，其中包括基于虚拟损耗最小的参数优化、基于切换系统稳定的参数优化，在开关频率变化时的滑动变阻器系数参数优化，结合参数的迭代进行滑动变阻器系数，导纳的参数优化，具体模型搭建与参数优化由下面小节给出。

4.1 模型结构与计算逻辑

在数值计算领域，将后退欧拉法与梯形积分算法进行对比分析，后退欧拉法在收敛特性方面展现出显著的优越性。与高阶积分算法相权衡，后退欧拉法的迭代格式呈现出更为简洁的数学结构与更高的计算效率。基于上述理论层面的分析结果，本研究决定采用后退欧拉法构建差分模型，以实现对相关系统的精确数值模拟。从理论原理而言，后退欧拉法凭借其独特的数值迭代机制，能够有效加速暂态误差的收敛进程，同时对数值振荡现象起到强有力的抑制作用。基于这一特性，在系统建模过程中，图 2-7 所示模型中的附加电阻可予以省略，从而简化系统模型，降低计算复杂度。

在深入探究开关支路功率特性时，从补偿虚拟功率损耗的理论视角出发，本研究创新性地提出在开关支路中引入能够产生功率的滑动变阻器模型。考虑到开关支路在关断状态下，依据电路基本理论，其稳态电流趋近于零这一特性，故而在开关支路的通态模型中串联滑动变阻器，以此优化电路模型的性能。此外，为有效抵消因开关频率变化所导致的导纳不恒定问题，将图 2-4 中的附加电阻替换为负阻抗滑动变阻器，并在关断状态的电容侧串联一个滑动变阻器，具体模型结构可参考图 4-1。

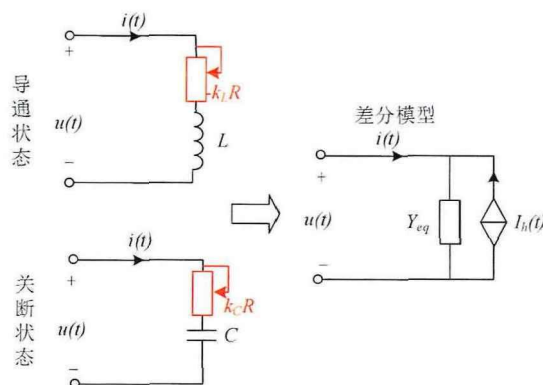


图 4-1 基于滑动变阻器的恒导纳模型

后退欧拉积分算法下滑动变阻器补偿模型的差分电路等效参数满足式(4-1)。

$$\begin{cases} Y_{eq} = 1 / (\frac{L}{\Delta t} - k_L R) = 1 / (\frac{\Delta t}{C} + k_C R_{ref}) \\ I_h(t) = \begin{cases} -(1 + k_L R Y_{eq}) i(t - \Delta t) \\ Y_{eq} u(t - \Delta t) \end{cases} \end{cases} \quad (3-29)$$

式中 k_L —— 电感支路负阻抗滑动变阻器系数；

k_C —— 电容支路滑动变阻器系数；

电力电子装置的实际工作特性本质上源自控制信号与电路参数的动态关系。以典型 IGBT 反并联二极管构成的开关模块为例（图 4-2），虽然单个器件的通断判断遵循明确的门槛准则，但当它们组合成现代柔直输电系统时，这种复合结构的非线性特征便显现出复杂机理。这种通用化设计在提升系统灵活性的同时，也给实时仿真带来了特殊挑战——既要兼顾模型精度，又要确保计算效率。

针对这一矛盾，工程界普遍采用整体建模策略来简化网络方程。当控制脉冲触发 IGBT 导通到关断时，将导致 RTDS 模型中电感所存储的电磁能释放掉，而 IGBT 从关断到导通时，将导致 RTDS 模型中电容所存储的电场能能释放掉，从而导致了虚拟损耗，若直接套用传统恒导纳模型，将导致虚拟功率的无意义损耗。为此，我们在模型中创新性地植入了负电阻滑动变阻器补偿机制，在维持计算稳定性的同时精准抵消了瞬态误差，而开关频率变化的时候，固定的负阻抗虚拟损耗补偿效果不好，所以应用负阻抗滑动变阻器来动态补偿开关频率变化时，虚拟损耗得以较好的补偿。

而在关断工况下，器件通常在零电压、零电流的条件下实现导通和关断操作，开关频率较低，功率损耗较小，所以一般不需要额外的补偿措施。

如图 4-2，其中，G 是 IGBT 的触发信号，取值为 1 时表示触发导通，取值为 0 时表示触发关断。

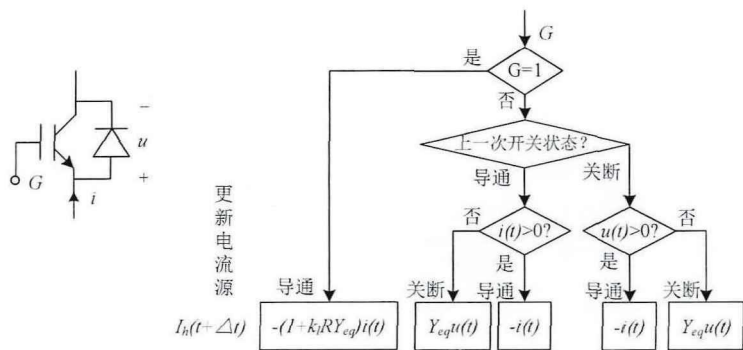


图 4-2 开关模块恒导纳模型计算逻辑

当开关模块的触发导通时间作用于单个开关周期 T 时，该负阻抗滑动变阻器的功率补偿特性可通过式(4-2)建立理论关系，其输出的平均补偿功率 P_{comp} 为：

$$P_{comp} = \frac{k_L R \int_0^T i^2(t)}{T} \quad (3-30)$$

针对图 4-3 所示三相两电平 VSC 拓扑，其运行阶段呈现关键物理特性：同相双桥臂的触发信号与开关状态在稳态工况下严格维持反相关系。在基波周期 T 下，可观测到上下桥臂导通时段满足总和为 T 的时间。若在参数推导过程中假设桥臂电流暂态误差对补偿功率影响微小，可以看成交流系统直接作用于负阻抗滑动变阻器模型。通过上述约束与理论，可获得式(4-3)所描述的单个换流器平均补偿功率 P_{comp} 模型：

$$P_{comp} \approx 2I_{ac}^2 k_L R \quad (3-31)$$

从功率补偿优化角度分析，负电阻参数值的提升虽然能减小虚拟损耗，却会引发系统特征根轨迹的右向偏移现象，导致稳定性裕度降低，这使得负电阻有一个约束，不能过大。对于开关器件构建的切换系统而言，其开关状态切换状态可以划分为多个子系统。负电阻虽然会引发子系统层面稳定性缺失，但通过构造符合性能指标的切换律，可实现切换系统层面的全局稳定工作模态。本研究以图 4-3 拓扑为对象，在确保暂态误差最小化与切换系统全局稳定性的双重约束下，推导恒导纳模型的最优导纳参数集。

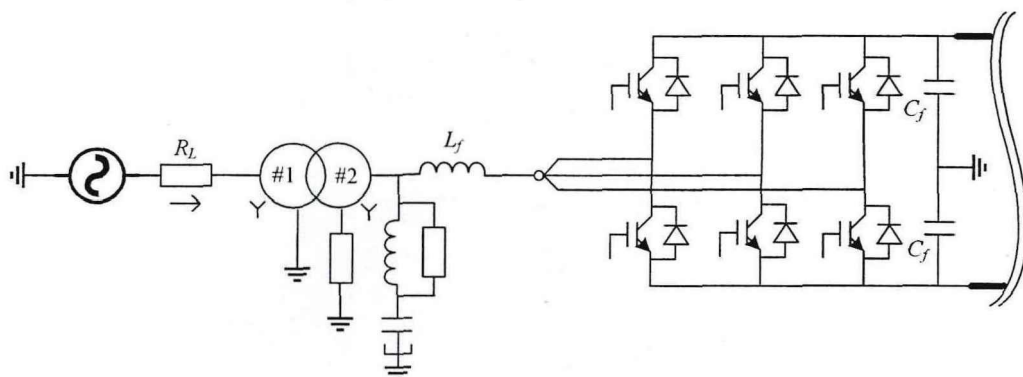


图 4-3 三相两电平 VSC 拓扑

4.2 参数优化设计

4.2.1 基于暂态误差最小的参数优化

在电力电子系统仿真研究中，恒导纳模型在开关切换瞬间产生的过渡性误

差与系统虚功损耗存在直接关联。这种瞬时误差不仅能够反映能量损耗程度，同时也是评估模型仿真精度的关键指标。为深入探究开关暂态误差与模型参数的量化关系，本研究创造性地通过对比储能元件在切换瞬间的暂态能量与稳态能量差值，建立了误差特征的数学表征体系。

针对换流器的稳态工作特性（直流侧电压保持相对恒定，交流侧电流呈现理想正弦波形），结合三相系统的对称特性，本方法创新性地采用解耦分析策略。通过将三相信号转化为图 4-4 所示的单相等效差分电路模型，显著简化了暂态过程的计算复杂度。这种处理方式既保证了分析的物理本质，又大幅提升了运算效率。下标 u 表示上桥臂，下标 d 表示下桥臂， U_{dc} 为直流电压， i_{ac} 为单相交流电流。

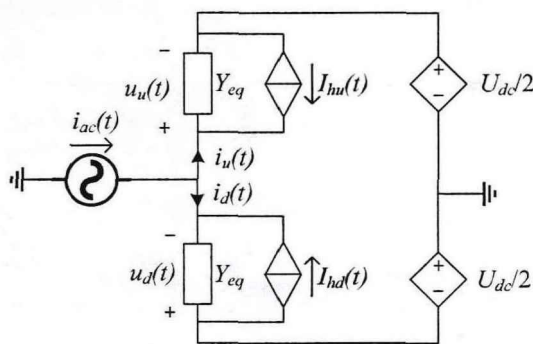


图 4-4 单相差分电路

图 4.4 所示单相差分电路有两种切换过程：

在时间小于开关变化状态时为上桥臂导通，下桥臂关断，在 $t=t_1$ 时刻，上桥臂刚刚关断，下桥臂刚刚导通。

在这个切换过程中，上桥臂刚刚关断，下桥臂刚刚导通时，电压电流满足(4-4)：

$$\begin{cases} u_u(t_1) \approx -k_L R i_{ac}(t_1) & i_u(t_1) \approx i_{ac}(t_1) \\ u_d(t_1) \approx U_{dc} - k_L R i_{ac}(t_1) & i_d(t_1) \approx 0 \end{cases} \quad (3-32)$$

根据式 (4.1) 和 (4.4)，等效电流源 I_{hu} 和 I_{hd} 可表示为式 (4-5)。

$$\begin{cases} I_{hu}(t_1 + \Delta t) = Y_{eq} u_u(t_1) = -Y_{eq} k_L R i_{ac}(t_1) \\ I_{hd}(t_1 + \Delta t) = -(1 + k_L R Y_{eq}) i_d(t_1) = 0 \end{cases} \quad (3-33)$$

根据图 4-4 所示电路联立式 (4-4) 和式 (4-5)，可表示为式 (4-6)。

$$\begin{cases} u_u(t_1 + \Delta t) = \frac{i_{ac}(t_1 + \Delta t) - U_{dc}Y_{eq} - Y_{eq}k_L Ri_{ac}(t_1)}{2Y_{eq}} \\ i_d(t_1 + \Delta t) = \frac{i_{ac}(t_1 + \Delta t) + U_{dc}Y_{eq} - Y_{eq}k_L Ri_{ac}(t_1)}{2} \end{cases} \quad (3-34)$$

根据开关模型,上桥臂等效为电容,下桥臂等效为电感,其稳态值为:

$$\begin{cases} u_u(\infty) = -U_{dc} - k_L Ri_{ac}(\infty) \\ i_d(\infty) = i_{ac}(\infty) \end{cases} \quad (3-35)$$

因为暂态过程时间很短,所以近似认为 $i_{ac}(\infty) \approx i(t_1) \approx i(t_1 + \Delta t)$, 所以可以推导出切换状态的虚拟损耗:

$$\begin{aligned} E_{diff1} &= \frac{L}{2} [i_d^2(\infty) - i_d^2(t_1 + \Delta t)] + \frac{C}{2} [u_u^2(\infty) - u_u^2(t_1 + \Delta t)] \\ &= \frac{(ai_{ac}^2(t_1) + bU_{dc}i_{ac}(t_1) + cU_{dc}^2)\Delta t}{8Y_{eq}} \end{aligned} \quad (3-36)$$

$$a = -Y_{eq}^3 k_L^3 R^3 + 4Y_{eq}^2 k_L^2 R^2 + 7Y_{eq} k_L R + 2;$$

$$\text{式中 } b = 2Y_{eq} k_L^2 R^2 + 6Y_{eq}^2 k_L R$$

$$c = 2Y_{eq}^2 - Y_{eq}^3 k_L R$$

在时间小于开关变化状态时为下桥臂导通,上桥臂关断,在 $t = t_2$ 时刻,上桥臂刚刚导通,下桥臂刚刚关断。

参考上一个开关状态变换,可以得到本开关切换状态的虚拟损耗 E_{diff2} 为式(4-9):

$$E_{diff2} = \frac{(ai_{ac}^2(t_2) - bU_{dc}i_{ac}(t_2) + cU_{dc}^2)\Delta t}{8Y_{eq}} \quad (3-37)$$

如果周期 T 内开关切换有 N 次,一个周期 T 内虚拟损耗 E_{diff} 为式(4-10)。

$$E_{diff} = \sum_{n=1}^N E_{diffn} \quad (3-38)$$

因为在半个周期后,电流会从正值变为等大的负值,即 $i_{ac}(t_1) = -i_{ac}(t_1 + \frac{T}{2})$,

所以在一个周期内,虚拟损耗可以化简为:

$$E_{diff} = \sum_{n=1}^N \frac{(ai_{ac}^2(t_n) + cU_{dc}^2)\Delta t}{8Y_{eq}} \quad (3-39)$$

因为步长很小,所以可以化为积分:

$$E_{diff} = \int_0^T \frac{(ai_{ac}^2(t) + cU_{dc}^2)}{8Y_{eq}} dt = \frac{aA^2}{16Y_{eq}} + \frac{cU_{dc}^2}{8Y_{eq}} \quad (3-40)$$

求式 (4-12) 关于 Y_{eq} 的导数, 得到式 (4-13)。

$$\frac{dE_{diff}}{dY_{eq}} = \frac{a_1 Y_{eq}^3 + b_1 Y_{eq}^2 + c_1}{8Y_{eq}^2} \quad (3-41)$$

$$\text{式中} \begin{cases} a_1 = -2U_{dc}^2 k_L R - A^2 k_L^3 R^3 \\ b_1 = 2U_{dc}^2 + 2A^2 k_L^2 R^2 \\ c_1 = -A^2 \end{cases}$$

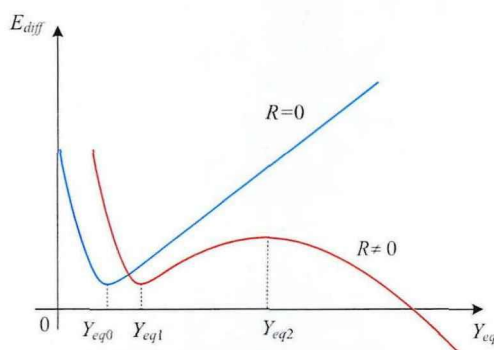


图 4-5 暂态能量误差曲线

由式(4-14)可知, 当 $k_L R > 0$ 时, $E_{diff}(Y_{eq})$ 的导数在区间 $Y_{eq} \in (0, \infty)$ 内存在 2 个零点, 设依次为 Y_{eq1} 和 Y_{eq2} , 其中 $Y_{eq2} = 1/k_L R$, $E_{diff}(Y_{eq})$ 在区间 $Y_{eq} \in (0, Y_{eq1})$ 内单调递减, 在区间 $Y_{eq} \in (Y_{eq1}, Y_{eq2}]$ 内单调递增, 在区间 $Y_{eq} \in (Y_{eq2}, \infty)$ 内单调递减, 因此最优参数应选为 $E_{diff}(Y_{eq})$ 的极小值点 $Y_{eq} = Y_{eq1}$, 曲线 $E_{diff}(Y_{eq})$ 如图 4-5 所示,

综合以上, 所提模型的最优恒导纳参数 Y_{eq} 满足:

$$Y_{eq} = \frac{A^2 k_L R + A \sqrt{5A^2 k_L^2 R^2 + 8U_{dc}^2}}{4U_{dc}^2 + 2A^2 k_L^2 R^2} \quad (3-42)$$

4.2.2 基于切换系统稳定的参数优化

电力电子系统本质上属于一种切换系统, 其稳定性不仅取决于子系统特性, 还与各子系统的持续时间(驻留时间)及切换规律相关。以电压源换流器(VSC)为例, 其采用的脉宽调制(PWM)技术会引发系统切换规律的正弦周期性变化。具体而言, 当调制波呈现正弦特性时, 子系统驻留时间会随载波频率改变而动态调整, 进而影响系统整体稳定性。

以图 4-3 所示双端换流器系统为例, 在忽略 IGBT 开关延迟的理想状态下, 系统存在 64 种开关状态(对应 64 个子系统)。由于实际调制波并非理想正弦波,

导致系统稳定性分析复杂度显著提升。为解决此问题，本研究通过模型简化方法，将复杂系统的稳定性分析映射至简化切换系统，并建立恒导纳模型参数与简化系统稳定性的对应关系以确定关键参数边界。

简化过程分两个层面实施：首先，基于系统稳态运行特征（换流电抗器网侧电压近似正弦、直流电压基本恒定），将原三相双端系统等效为单相单端系统（图 4-6），其中换流电抗采用梯形积分法建模。其次，在控制层面忽略内外环动态过程，采用标准正弦波直接触发开环控制。此简化虽会导致阻尼特性弱化（表现为稳定边界保守化），但能突出核心参数对稳定性的影响。

最终获得的简化切换系统仅包含两个子系统：1 子系统对应上桥臂导通/下桥臂关断状态，2 子系统则为上桥臂关断/下桥臂导通状态。

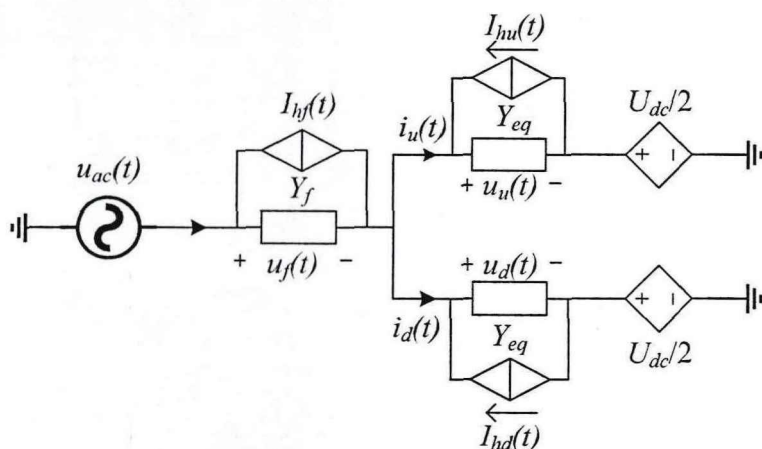


图 4-6 简化切换系统

这个离散系统可以列写状态方程如式 4-15 所示，其中 A 为状态变量， b 为输入矩阵。

$$\begin{bmatrix} I_{hf}(t+\Delta t) \\ I_{hu}(t+\Delta t) \\ I_{hd}(t+\Delta t) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_{hf}(t) \\ I_{hu}(t) \\ I_{hd}(t) \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} u_{ac}(t) \\ U_{dc} \end{bmatrix} \quad (3-43)$$

开关状态得到两种子系统下的状态方程，其中 A 为状态矩阵， b 为输入矩阵

$$A_1 = \begin{bmatrix} \frac{2Y_{eq} - Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{2Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{2Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} \\ \frac{Y_{eq}(1 + Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{(Y_{eq} + Y_f)(1 + Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{-Y_{eq}(1 + Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} \\ \frac{-Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} \end{bmatrix} \quad (3-44)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{2Y_{eq} - Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{2Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{2Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} \\ \frac{-Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} \\ \frac{Y_{eq}(1+Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{-Y_{eq}(1+Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{(Y_{eq} + Y_f)(1+Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} \end{bmatrix} \quad (3-45)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -\frac{4Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & 0 \\ -\frac{Y_{eq}Y_f(1+Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}(1+Y_{eq}k_L R)}{2} \\ \frac{Y_{eq}Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2} \end{bmatrix} \quad (3-46)$$

$$b_2 = \begin{bmatrix} -\frac{4Y_{eq}}{2Y_{eq} + Y_f} & 0 \\ \frac{Y_{eq}Y_f}{2Y_{eq} + Y_f} & \frac{Y_{eq}}{2} \\ -\frac{Y_{eq}Y_f(1+Y_{eq}k_L R)}{2Y_{eq} + Y_f} & -\frac{Y_{eq}(1+Y_{eq}k_L R)}{2} \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

当切换系统在不同工作模式间转换时，其描述动态特性的状态矩阵会同步发生改变。这种动态时变特性导致传统 Z 变换方法（适用于固定参数系统）难以直接求得系统行为的精确数学表达式。为解决这一分析难题，采用分步递推的计算策略：通过离散化时间轴，在每个计算步长内根据当前开关状态更新系统参数，并基于前一时刻的状态量递推得到当前数值解。这种阶梯状计算流程构建的数学模型最终推导如式(4-20)所示。

$$I_h(\lambda \Delta t) = A^{\lambda} I_h(0) + \sum_{j=0}^{\lambda-1} A^j b u[(\lambda-j-1)\Delta t] \quad (3-48)$$

式中 I_h ——状态变量矩阵；

u ——输入变量矩阵；

$A^i = A_1^i A_2^{\lambda-i}$, i 为 $0 \sim \lambda \Delta t$ 时间内子系统 i 运行的步长数

离散系统稳定性本质上与状态矩阵谱半径存在直接关联：当且仅当迭代过程中状态矩阵的谱半径满足 $\rho < 1$ 时，系统才具备渐进稳定性。在常规非切换场景中，若系统矩阵谱半径 $\rho > 1$ ，系统必然失稳（此时状态量呈指数级增长，类似雪球效应）；然而切换系统的特殊性在于，即便所有子系统的谱半径均超过临

界值（如 $\rho_1=1.5$, $\rho_2=0.6$ ），通过不同状态矩阵的交替作用，其组合效应可能产生“负负得正”的稳定现象——通过计算矩阵乘积的谱半径（此例中 $\rho=\rho_1 \times \rho_2=0.75<1$ ），可验证切换系统在特定切换规律下可实现稳定。

基于上述机理，本文提出通过监测谱半径乘积序列的演化趋势来评估系统稳定性。考虑到调制波周期 T 对系统行为的周期性影响，为消除初始相位扰动带来的误差干扰，特定义稳定性判据指标 S ：取系统启动瞬间（ $t=0$ ）与经历 4 个完整调制周期（ $t=4T$ ）时的谱半径数据点，通过计算两时刻间的变化率（即连接两点的割线斜率）来量化系统稳定程度，其数学表达式见式（4-21）。

$$S = \frac{\rho(A^{1+4T/\Delta t}) - \rho(A^1)}{4T} \quad (3-49)$$

当保证导纳和开关频率一定时， S 是关于负电阻滑动变阻器 $k_L R$ 的函数，随 $k_L R$ 单调递增。除了系统开关频率发生变化的情况，系统运行过程中，原系统负电阻滑动变阻器 $k_L R$ 在固定 Y_{eq} 和 f_c 下的取值应满足式(4-22)。

$$S(k_L R)|_{Y_{eq}, f_c} \leq 0 \quad (3-50)$$

将该公式与暂态误差最小的参数优化进行迭代，得到最优 Y_{eq} 与 $k_L R$ 的值，如果开关频率变化，则将暂态误差最小参数优化结合下面一节的滑动变阻器系数优化与式（4-22）进行迭代。

4.2.3 基于不同开关频率的滑动变阻器系数参数优化

增加滑动变阻器的目的在于，在使用固定负阻抗 $-R$ 时，通过离线计算确定的补偿值，仅在特定开关频率下最优，而在使用滑动变阻器 $-k_L R$ 时，引入调节系数 k_L ，使负阻抗动态适应开关频率变化，而 k_L 表示补偿强度随频率的缩放因子。

损耗的功率根据定义：单位时间内消耗的能量，所以从暂态来看，虚拟损耗的能量需要宏观上的负阻抗的滑动变阻器来补偿，虽然这个过程很短，但是可以将虚拟损耗视为在下一虚拟损耗到达之前的虚拟损耗的总量，所以可以看做开关在导通到关断这一段时间内的虚拟损耗，所以虚拟损耗的功率可以记为：

$$P_{diff} = E_{diff} f_{sw} \quad (3-51)$$

式中 f_{sw} ——开关频率（ s^{-1} ）；

由（4-23）可知，随着开关频率的增加，虚拟功率也在上升，从而导致虚拟损耗难以用单纯的负阻抗来补偿。所以负阻抗的滑动变阻器的系数 k ，应该与开关频率有关，才能在开关频率高的时候进行有效的补偿。

虚拟损耗的主要来源是离散模型在开关状态变化的时候，在电感和电容中储存能量的损失，再结合负阻抗所消耗的功率与虚拟损耗应该保证两者相减最小，得：

$$E_{\min} = \left(\frac{aA^2}{16Y_{eq}} + \frac{cU_{dc}^2}{8Y_{eq}} \right) f_{sw} - k_L R \frac{A^2}{2} \quad (3-52)$$

解公式（4-24）得：

$$k_{L\min} = \frac{f_{sw}}{A^2 R} \left(\frac{aA^2}{8Y_{eq}} + \frac{cU_{dc}^2}{4Y_{eq}} \right) - \frac{2E_{\min}}{A^2 R} \quad (3-53)$$

所以设计 k_L 与频率适配，并适应切换系统稳定和暂态误差最小进行联合迭代，并旨在开关频率变化时， k_L 满足切换系统稳定的同时保证暂态误差最小。而在开关频率变化时， k_L 随频率改变，而导纳也随之改变，而电容并未改变，所以在电容侧增加滑动变阻器 $k_C R$ ，来保证导纳矩阵依然恒定：

$$k_C = \frac{1}{R} \left(\frac{L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{C} \right) - k_L \quad (3-54)$$

此时在电容侧的滑动变阻器是正值电阻，为减少公式 R 的数量，定义该滑动变阻器的电阻值为 R 为负阻抗滑动变阻器的相反数。因此，如果开关频率变化时，导纳是变化的，需要在开关频率稳定到新状态下，导纳能够恒定，而不需要重新制定参数更改全部网络结构，只需要调节滑动变阻器的系数就可以实现导纳的变化。

4.3 滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型 MATLAB 实现

双馈异步风力发电机换流器恒导纳数学模型整理总结如下：

$$\begin{cases} Y_{eq} = 1 / \left(\frac{L}{\Delta t} - k_L R \right) = 1 / \left(\frac{\Delta t}{C} + k_C R_{ref} \right) \\ I_h(t) = \begin{cases} -(1 + k_L R Y_{eq}) i(t - \Delta t) \\ Y_{eq} u(t - \Delta t) \end{cases} \end{cases} \quad (3-55)$$

其中 k_L 为参数优化迭代出来的数值， k_C 为跟随 k_L 变化的数值，在上一节的参数优化中已经详细给出，这里不再赘述。

由双馈异步风力发电机中换流器恒导纳模型在 MATLAB 中的程序仿真模型如下：

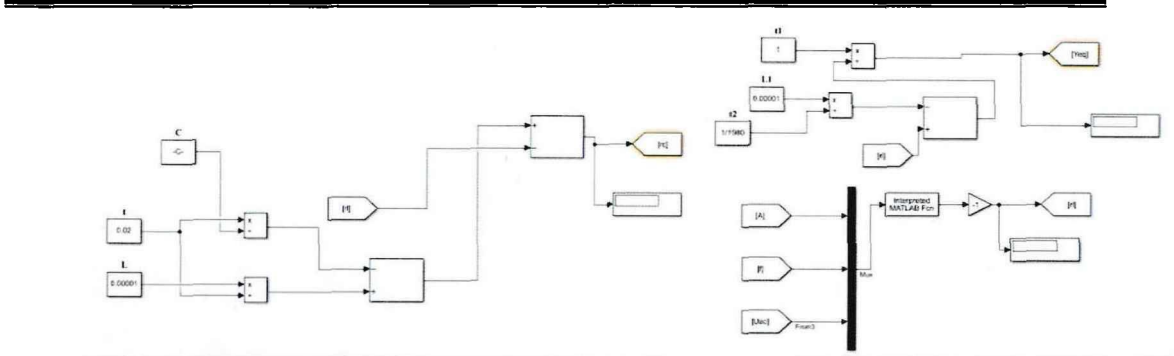


图 4-7 双馈风机换流器恒导纳参数运算 MATLAB 程序展示

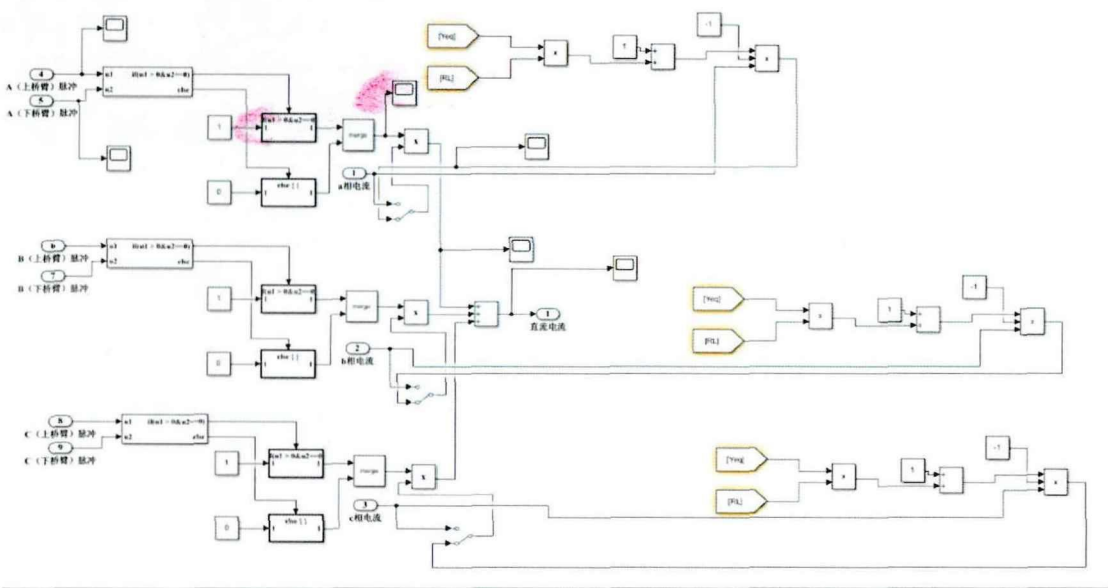


图 4-8 双馈风机换流器 MATLAB 程序展示

参数运算得到的最优导纳和虚拟损耗是通过 4.2 节中的最优参数迭代算出，这里不进行赘述。模型中的开关均是用于对比实验，总体思路如下：换流器三相经过之前最优导纳的计算得到电压，通过脉冲信号整流得到直流电流。

4.4 本章小结

在本章中从物理层面构建了 VSC 换流器恒导纳模型的负阻抗滑动变阻器的建模和参数优化，首先进行了基于滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型的建模，旨在减少在开关频率变大时，虚拟损耗增长的问题，负阻抗滑动变阻器的补偿需要三个参数进行迭代，第一个参数优化是开关频率没有变化时虚拟损耗最小时的导纳，第二个参数优化是保证 kR 的添加使得系统切换频率的稳定，第三个参数优化是在开关频率变化时才进行的迭代，保证开关频率变化时，虚拟损耗最小的参数优化。这三个参数优化旨在开关频率改变时，能将负阻抗滑动变

阻器的系数与频率相关，在开关频率增大时，使得负阻抗补偿值更多，从而减小虚拟损耗，具体仿真步骤在第五章进行分析。

第 5 章 算例仿真与验证

本章节主要通过仿真验证所提恒导纳模型的准确性，以及基于 MATLAB 搭建的双馈异步发电机模型的准确性。本文采用分层建模策略对双馈异步风力发电机导纳特性展开系统性研究。第二章基于 MATLAB/Simulink 平台构建了包含电气-机械耦合特性的双馈机组多物理场数学模型，常规建模方法获得的系统导纳矩阵呈现显著时域动态特性。第三章通过结构分解法揭示导纳时变本质源于发电机动态导纳矩阵中与转子角速度相关的非线性耦合项，提出基于参数离散化处理的层级式建模方法：通过引入特征参数提取算法对转子角速度进行多模态分解，采用典型特征值替代法构建具有分段恒定特性的等效导纳矩阵，实现以可控存储资源为代价的时变系统恒导纳表征。第四章面向换流器动态特性建立具有阻抗自适应调节功能的负阻抗补偿模型，创新性地引入开关频率调制因子修正虚拟损耗函数，推导出考虑功率器件开关动态的换流器恒导纳解析表达式。通过构建多工况对比验证平台，采用数值仿真手段对所提恒导纳模型的动态响应精度进行定量评估：建立双参数协同扫描测试场景，验证机组模型在宽转速范围内的阻抗特性收敛性；本章节设计扰动注入实验，通过时频域联合分析方法验证恒导纳模型与原型机的动态误差率，验证分层设计的恒导纳模型与原型机做对比并对比计算内存与误差，对换流器建立三模态对比验证体系：采用双标称值电阻网络模型（ $0.001\ \Omega/10^6\ \Omega$ ）、负阻抗补偿型恒导纳方案及变阻器补偿型恒导纳方案构建闭环测试环境，对滑动变阻器补偿的换流器恒导纳模型进行仿真。

5.1 系统参数配置

整体的双馈异步风力发电机结构如图 2-1 所示。设置实验仿真步长为 $5\ \mu s$ ，风机系统元件参数如表 5-1 所示。

表 5-1 风机系统元件参数

元件	参数	数值	参数	数值
风力机	空气密度	1.225kg/m^3	叶片半径	73.0m
	额定转速	13rad/min	额定风速	8.8m/s
	切入风速	2.5m/s	切出风速	20.0m/s

表 5-1（续表）

元件	参数	数值	参数	数值
发电机	额定容量	3.1MW	额定机械转矩	83.97kN·m
	额定电压	690V	额定转子磁链	2.07Wb（RMS）
	额定频率	58.82Hz	定子绕组电阻	0.0006pu
	极对数	6	定子绕组漏抗	0.0401pu
	d 轴同步电抗	0.54pu	q 轴同步电抗	1.04pu
	D 轴绕组电阻	0.045pu	D 轴绕组电抗	0.70pu
	Q 轴绕组电阻	0.045pu	Q 轴绕组电抗	1.065pu
	阻尼系数	0.9	交流等效阻抗	26.48∠80° Ω
	开关电压	1.45kV	换流变压器漏抗	0.1pu
	PWM 载波频率	1980Hz	换流电抗	0.0724H
换流器	直流电容	300μF	滤波器截止频率	450Hz
	机侧开关电流	1.5kA	滤波器品质因数	0.08
	网侧开关电流	170A	滤波器补偿容量	75Mvar

为了验证本文所提恒导纳模型的准确性，以及基于 MATLAB 搭建的双馈异步发电机模型的准确性，分别在 MATLAB 平台上用常规发电机模型和恒导纳模型,搭建了发电机单机接负载和双馈异步风力发电机完整机组接电网的仿真模型，并分别对其稳态、小扰动、大扰动等工况进行了仿真实验，电路原图如图 5-1 所示。

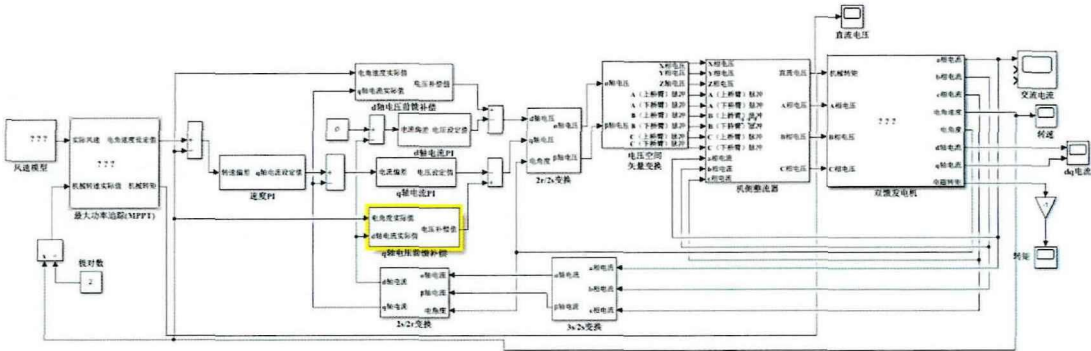


图 5-1 完整双馈异步风力发电机仿真模型

5.2 自补偿发电机仿真结果

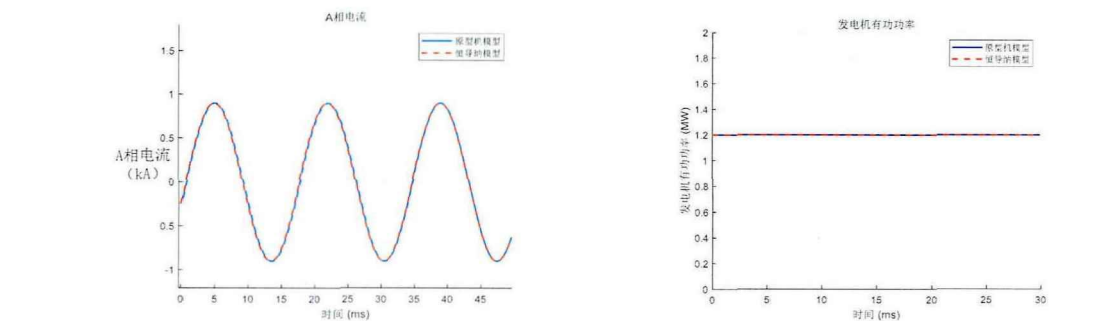
在隔离式发电机组数学建模过程中，本研究采用简化的系统架构方案。模

型框架仅保留能量转换核心组件（风力机、齿轮箱、电磁转换单元），且电力输出端口配置复合型阻抗网络作为电能消纳终端。需特别说明的是，工业级风能转换系统在实际部署时普遍采用变流调控拓扑结构，特别是双馈型发电单元必须通过转子回路功率调节装置实现并网适配。当前研究有意省略变频控制模块，旨在构建纯净的机电动态分析环境，便于校验新型恒参数导纳建模法在能量转换环节的数学表征精度。

实验方案采用分级扰动注入机制：首先通过稳态运行与微幅扰动工况验证系统平衡态的收敛特性，其次通过预设不同时空分布特性的短路事件（包含三相平衡扰动与多相失衡扰动）来考察暂态过程的动态响应特性。这种分阶段测试架构可系统评估模型在不同能量层级扰动下的鲁棒性表现，重点考察其稳态稳定性与暂态稳定性。

5.2.1 静态稳定仿真

进行阵风加自然风的转子角速度缓慢变化的实验，并进行分层设计的恒导纳模型与原型机进行对比，稳态正常运行仿真波形如图 5-2 所示。图例中恒导纳和原型机则分别代表了基于 MATLAB 平台搭建的双馈异步风力发电机恒导纳模型和原型机的仿真数据。初始转速设定为额定转速 25rad/s.



(a) 单机接负载稳态仿真 A 相电流曲线 (b) 单机接负载稳态仿真发电机有功功率曲线
图 5-2 单机接负载稳态仿真

在单机连接负载的运行场景下，图 5-2 展示了系统处于稳态时的运行仿真结果。其中，图 5-2 (a)呈现的是稳态运行时发电机输出端的电流情况，通过对电流曲线的分析，可以清晰地了解到该工况下电流的幅值、相位等特征参数；图 5-2 (b)则聚焦于发电机输出的有功功率，直观反映出稳态时发电机向负载输送电能的功率水平。

而图 5-3 和图 5-4 则对应着系统发生风速变化时的状况，该图展示了在此动态过程中的仿真波形，有助于深入研究系统在受到微小干扰时，各电气量随时间的变化规律以及系统的动态响应特性。

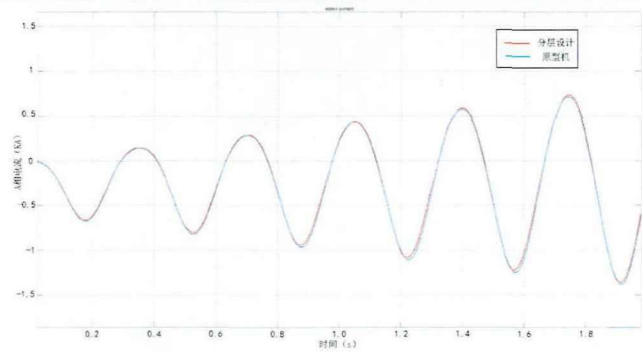


图 5-3 阵风小扰动 A 相电流

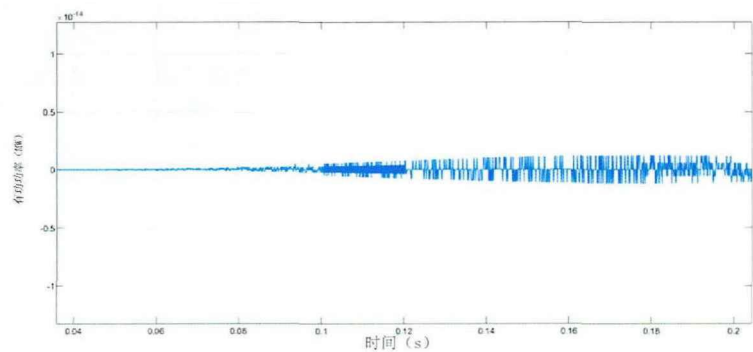


图 5-4 阵风小扰动发电机有功功率

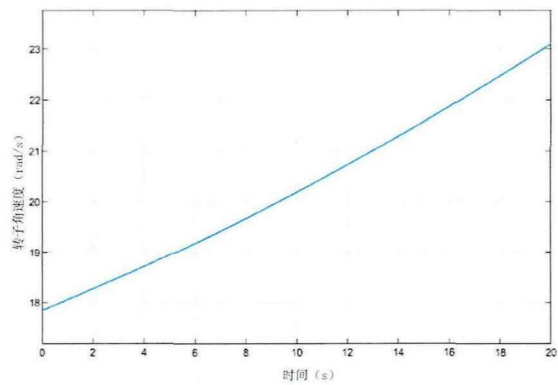


图 5-5 阵风小扰动未分层的转子角速度

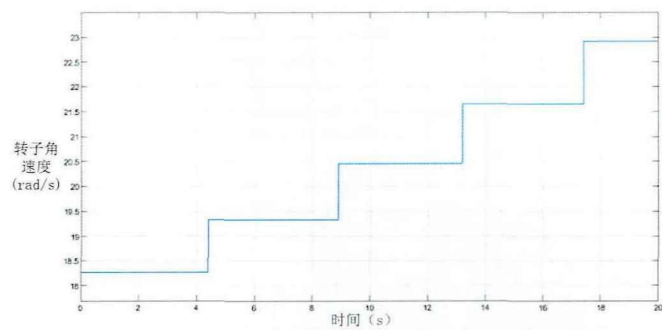


图 5-6 阵风小扰动分层设计的转子角速度

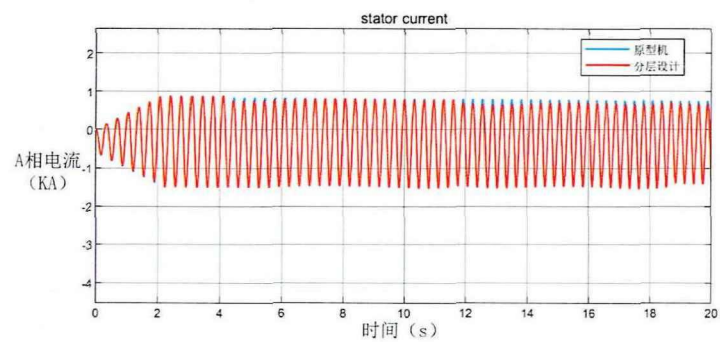


图 5-7 阵风小扰动分层设计的 A 相电流

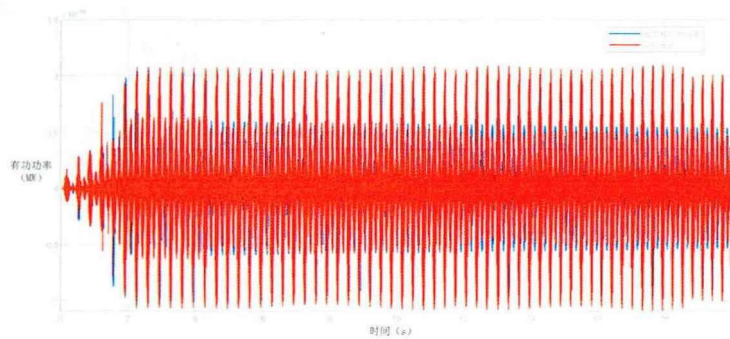


图 5-8 渐变风小扰动有功功率

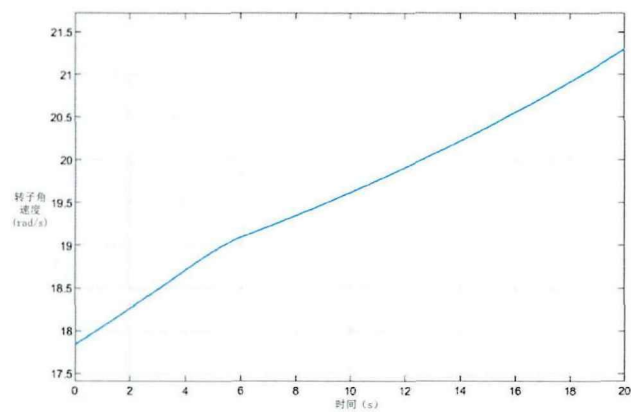


图 5-9 渐变风小扰动未分层的转子角速度

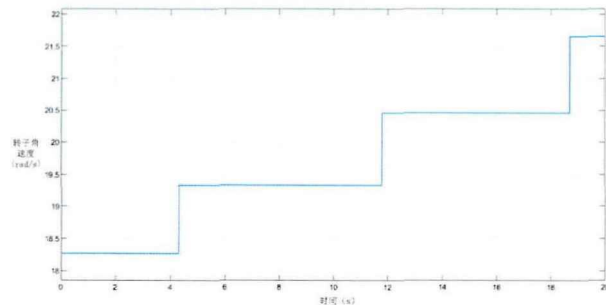


图 5-10 渐变风小扰动分层设计的转子角速度

在针对发电机运行特性的研究中，图 5-4 成为重点观测对象。该图清晰呈

现出发电机在转子角速度缓慢攀升的工况下，机端 A 相电流的动态变化过程。与之对应的图 5-5，则展示了利用分层设计转子角速度呈阶梯攀升的状态。

为全面揭示分层设计对双馈异步风力发电机的作用机制与影响过程设计了一项实验。实验设定从 4s 时刻开始，让风速速度以缓慢且稳定的速率上升，直至 6s 时刻结束。此过程模拟风速缓慢增加的实际场景。

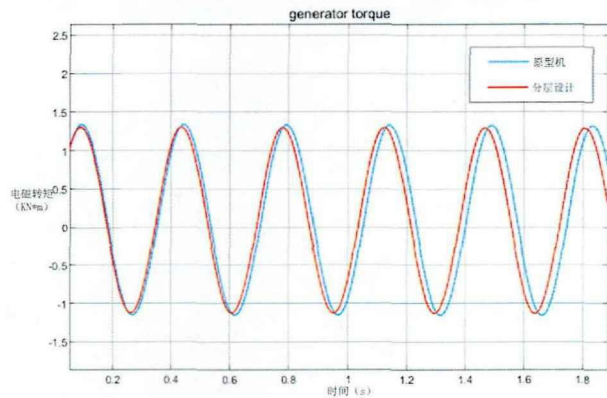


图 5-11 渐变风电磁转矩变化仿真曲线

图 5-8—图 5-11 展示了在分层设计架构下，转子转速发生突变后，波形逐步趋于稳定的过程，期间误差控制在 5% 以内。尽管采用突变形式来模拟平滑变化，却通过恒导纳模型实现了计算速度与内存使用上的优化。类似地，图 5-6 呈现出同样在分层设计下，转子转速突变至波形稳定的动态过程，误差同样被限制在 5% 以内，且借助恒导纳模型有效提升了计算效率并优化了内存管理。

通过对相关曲线观察发现，无论是在稳态运行条件下，还是在遭受小扰动 的情况下，采用分层设计的发电机模型均展现出较高的仿真精度。将该模型的仿真结果与未经近似处理的精确模型进行对比，二者拟合度极高，这有力地验证了分层设计的恒导纳模型在描述发电机运行特性方面具备良好的有效性与可靠性，为进一步研究发电机运行特性提供了坚实的理论与实践支撑。

5.2.2 暂态稳定仿真

仿真实验的定子侧发生单相接地短路，发生时间为 3s，持续时间为 4.4s。其中 A 相电流仿真波形以及电磁转矩暂态特性如图 5-7 和图 5-8 所示。

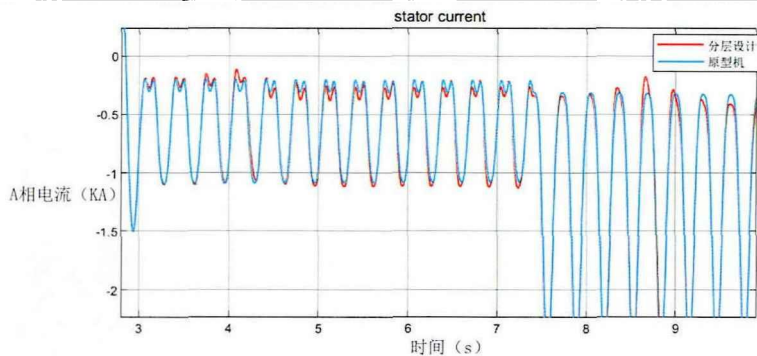


图 5-12 单相接地短路 A 相电流仿真曲线

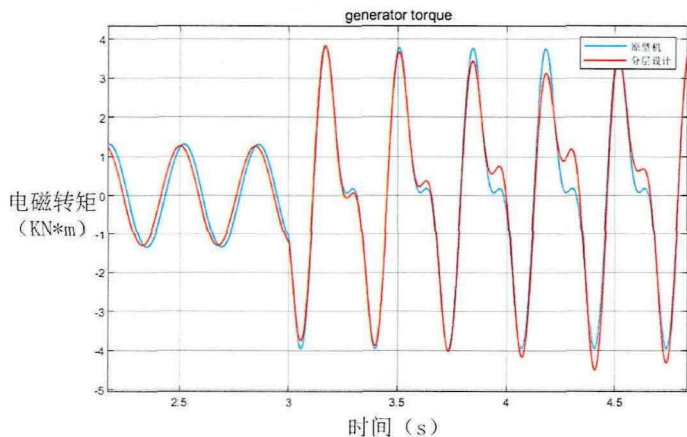


图 5-13 单相接地短路电磁转矩仿真曲线

图 5-14—图 5-15,分别为在对称故障下, 分层遴选设计模型与原型机的 A 相电流与电磁转矩的区别。可以得到, 自补偿的发电机模型拟合程度较高。

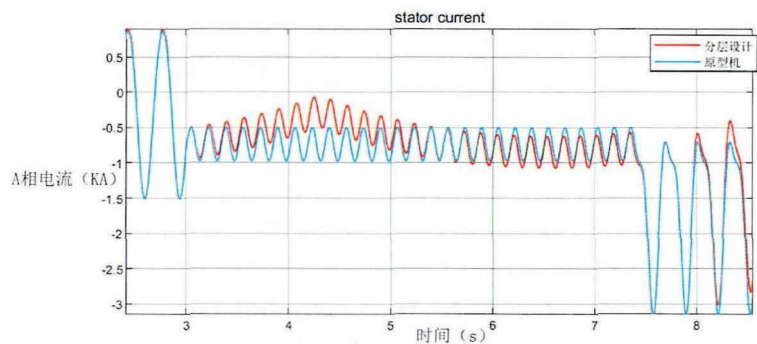


图 5-14 三相对称故障 A 相电流仿真曲线

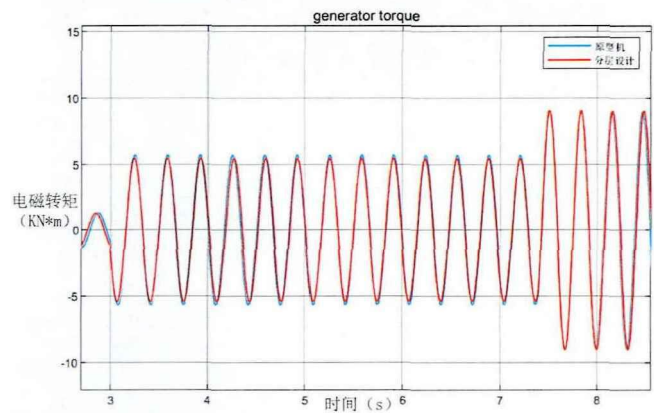


图 5-15 三相对称故障电磁转矩仿真曲线

5.3 完整自补偿发电机仿真结果

经过上一节的自补偿发电机的仿真，基本确定了自补偿发电机恒导纳模型的仿真时的精确度，本小节进行完整自补偿发电机仿真。

5.3.1 换流器控制仿真

本小节测试了发电机经过负阻抗滑动变阻器补偿的换流器的完整 DFIG 稳态时的仿真波形，与发电机经过双值电阻的换流器作对比，稳态机侧网侧 A 相电压如图 5-16—图 5-17 所示，稳态机网侧有功功率如图 5-18~图 5-19 所示。

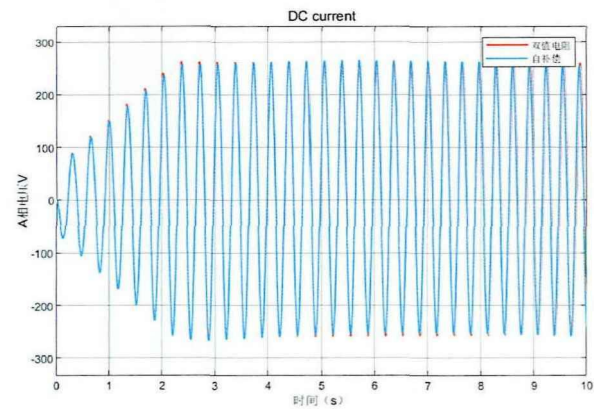


图 5-16 稳态机侧 A 相电流仿真曲线

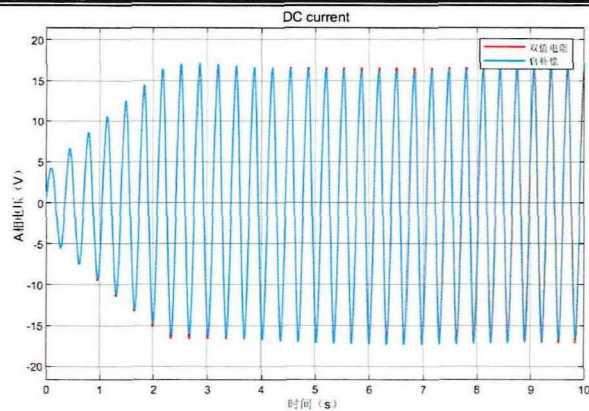


图 5-17 稳态网侧 A 相电压仿真曲线

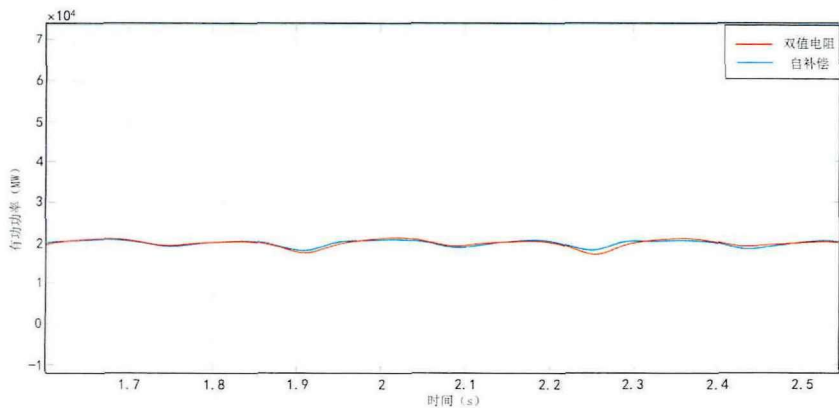


图 5-18 稳态机侧有功功率仿真曲线

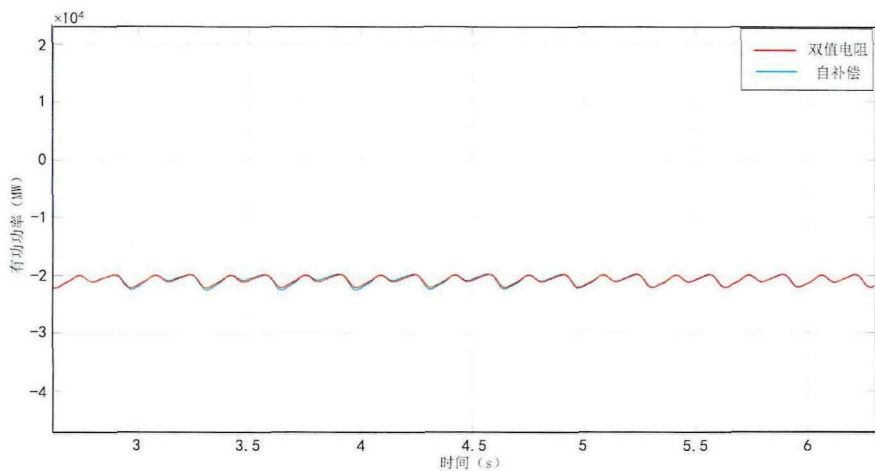


图 5-19 稳态网侧有功功率仿真曲线

双值电阻模型与滑动变阻器补偿的换流器模型桥臂电流如图 5-20 所示，相较于双值电阻模型有较大的改善，在虚拟损耗方面能够得到较大补偿。

5.3.2 静态稳态仿真

该节测试了发电机经过换流器并网的完整 DFIG 自补偿恒导纳机组在风速变化情况下的波形。仿真实验的小扰动为在风速缓慢增加的情况;扰动发生时间为 4s，持续时间为 2s，小扰动波形如图 5-20-图 5-24 所示。

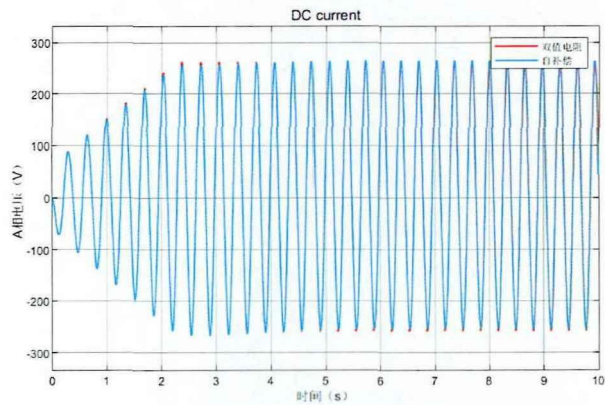


图 5-21 小扰动机侧 A 相电压仿真曲线

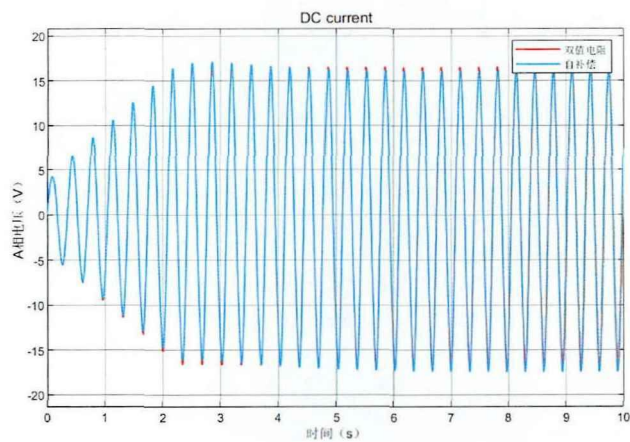


图 5-22 小扰动网侧 A 相电压仿真曲线

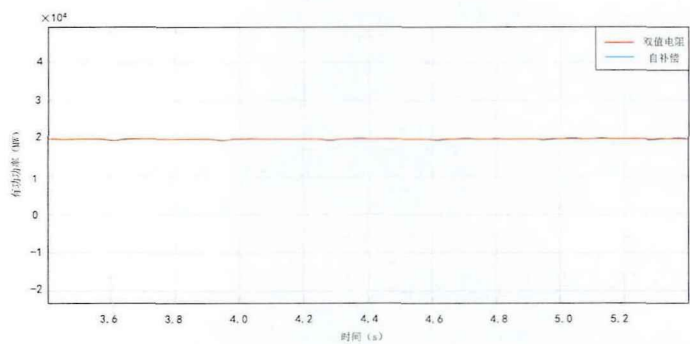


图 5-23 小扰动机侧有功功率仿真曲线

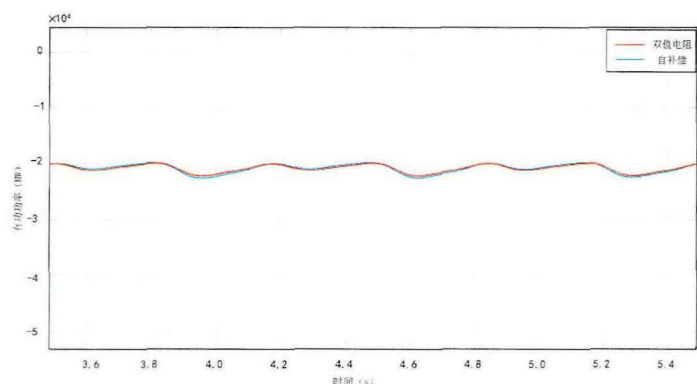


图 5-24 小扰动网侧有功功率仿真曲线

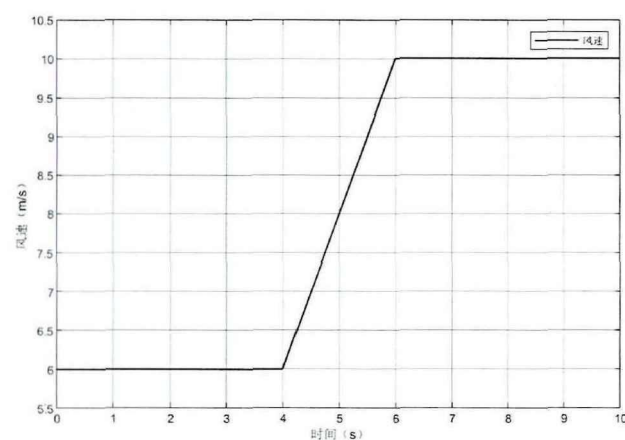


图 5-25 小扰动风速仿真曲线

由上图可知，双值电阻模型与转子遴选加负阻抗滑动变阻器补偿的 DFIG 模型拟合程度较高，图 5-21 和图 5-22 为风速缓慢增加的机侧网侧 A 相电压的仿真曲线，图 5-23 和图 5-24 为风速缓慢增加的机侧网侧有功功率仿真曲线。

5.3.3 暂态稳定仿真

该节测试了发电机经过换流器并网的完整 DFIG 自补偿恒导纳机组在对称故障与非对称故障情况下的波形。扰动发生时间为 3s，持续时间为 4.4s，波形如图 5-24-图 5-27 所示。

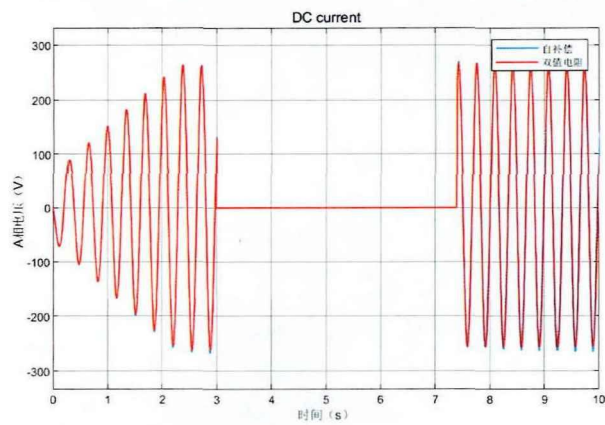


图 5-24 暂态机侧 A 相电压仿真曲线

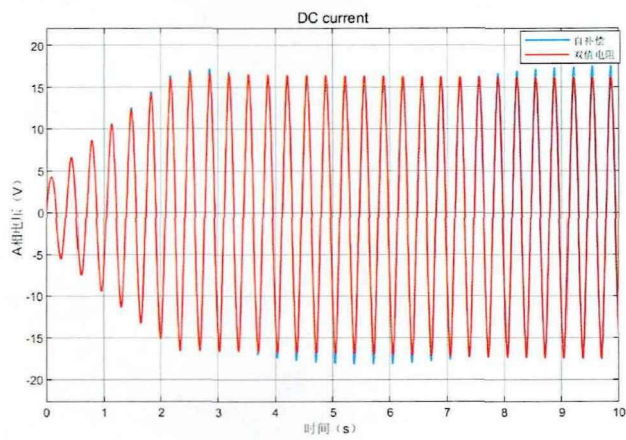


图 5-25 暂态网侧 A 相电压仿真曲线

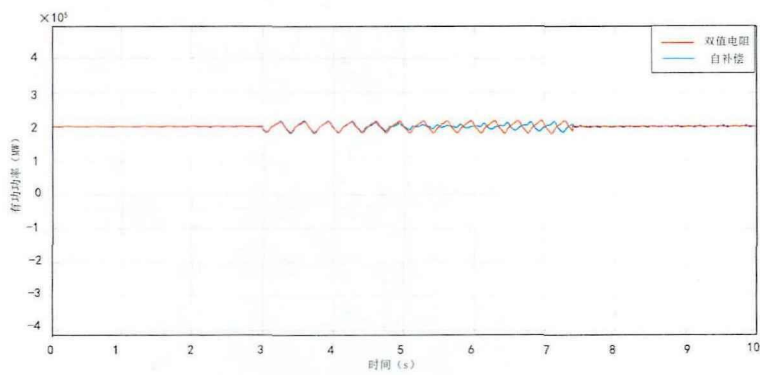


图 5-26 暂态机侧有功功率仿真曲线

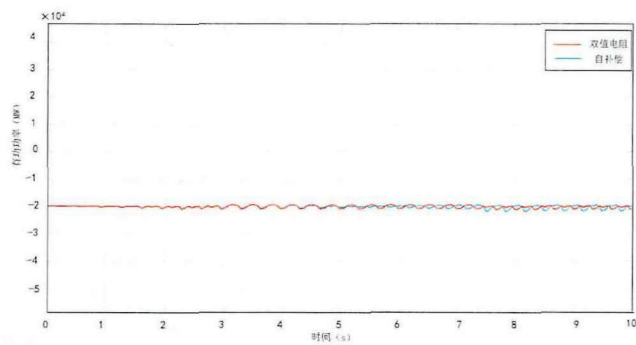


图 5-27 暂态网侧有功功率仿真曲线

图 5-24、图 5-25 为非对称故障下的机侧网侧 A 相电压的仿真曲线，图 5-26、5-27 为非对称故障下的机侧网侧有功功率的仿真曲线。

逆变装置在此过程中展现出优异的保护性能，有效阻断了故障能量传递，发电机组端口参数保持稳定，输出功率曲线也趋于平稳状态。

5.4 仿真模型有效性总结

上面内容展示了双馈异步风力发电机恒导纳仿真模型的可行性与准确性，下面对模型的有效性进行进一步的总结与补充。

因为遴选设计的双馈风机恒导纳模型是在短时域内固定转子角速度，以列表的方式来遴选转子角速度，所以，体现有效性在于这种方法的时效性与长期仿真下的时间复杂度，因此，这里进行时间维度的对比：

表 5-1 传统转子角速度与遴选恒导纳仿真计算速度对比

	传统非恒导纳	遴选恒导纳模型
时间 (s)	1497.6	973.4

频率变化时，本文换流器恒导纳模型的虚拟损耗占比与负阻抗补偿的虚拟损耗占比对比表格如下：

表 5-2 功率损耗比例

模型	开关频率	开关频率	开关频率
	$f_c=1980\text{Hz}$	$f_c=3000\text{Hz}$	$f_c=6000\text{Hz}$
	虚拟损耗占比	虚拟损耗占比	虚拟损耗占比
负阻抗补偿模型	5.00	6.00	12.00
本文所提模型	4.87	5.57	6.65

虽然随着开关频率增加虚拟损耗依然有增长趋势，但是随开关频率增长的不大，虚拟损耗小于百分之 7，所以印证本文模型的有效性。

5.5 本章小结

本章主要对本文所提出的基于自补偿的恒导纳 DFIG 模型进行仿真验证，首先进行自补偿发电机的仿真验证，对发电机的恒导纳模型的静态稳定和暂态稳定进行验证，证明所提出的转子角速度遴选机制和原型机相差不大，并且在不影响精度的情况下，改善了计算量。

之后通过对完整自补偿发电机进行仿真验证，主要针对负阻抗滑动变阻器补偿的仿真模型进行验证，从静态稳定暂态稳定两方面进行验证，来证明所提出的自补偿的 DFIG 恒导纳模型与原始 DFIG 对照组接近，并在不影响精度的情况下，改善了计算量与资源。

通过第五章的仿真验证，证明在第三章与第四章提出的数学模型能够实现双馈异步风力发电机的恒导纳模型的仿真与建立。

第 6 章 结论与展望

6.1 总结

在新能源发电规模化发展的背景下，双馈异步风力发电机（DFIG）的建模仿真因时变特性复杂面临计算量过大与换流器虚拟损耗较大的挑战，本文做出以下研究：

（1）本文进行双馈异步风力发电机电磁暂态模型和机械力矩部分的推导与总结，风力机部分公式的总结，以及换流器基本建模的总结与阐述，表明了现有双馈异步风力发电机与换流器模型的不足，从而引出本文的创新点。

（2）本文创新性地提出自补偿恒导纳建模方法，通过分解导纳矩阵为时不变与含转子角速度的时变矩阵，结合典型值遴选机制实现参数分段映射，有效控制误差阈值，控制转子角速度在短范围内恒定不变，从而控制导纳矩阵恒定，解决了传统模型在动态工况下的仿真计算资源浪费且计算量过大的问题。

（3）针对换流器开关频率变化引发的虚拟损耗，引入负阻抗滑动变阻器动态补偿策略，通过调节等效导纳参数，既保持了模型静态特性，又显著提升了高频开关行为的跟踪精度。仿真验证表明，改进后的模型在不对称故障下能稳定导纳矩阵，静态与暂态响应与原型机高度吻合，为复杂工况下的电磁暂态仿真提供了可靠工具。

（4）本文对双馈异步风力发电机的转子角速度遴选补偿和换流器负阻抗滑动变阻器结合，仿真研究表明，改进之后的模型与原型机的模型吻合程度高，并且经过静态稳定和暂态稳定表明本文提出的论证的正确性。

综上完成了双馈异步风力发电机的导纳矩阵恒定的仿真模型，从而提高计算效率，改善计算资源浪费的问题，精度与原型机接近，使双馈异步风机得到很好的补偿。

6.2 展望

关于系统的分层设计理念，传统的二分法可能不足以满足需求。实际上，各层之间应存在一种基于函数关系的联系，这种函数关系能更精准地反映系统特性。在高转子角速度的工况下，已经积累了一定的经验分析成果。倘若能够把不同转子角速度下具有代表性的导纳模型储存起来，进而构建出发电机的恒导纳模型，这对于实际工程应用来说，无疑是一项极具价值的突破，能显著提

升工程实践中的效率与稳定性。

未来研究可进一步探索该模型在真实风场多机协同运行中的适应性，尤其是极端风速突变或电网振荡场景下的动态稳定性验证。此外，模型参数遴选机制可结合机器学习算法优化典型值选取效率，提升复杂工况的泛化能力。针对不同机型或混合能源接入场景，需验证模型的可扩展性，并结合硬件在环测试推进工程化应用落地。随着新型半导体器件高频化发展，动态补偿参数的实时调整机制仍有优化空间，或可通过自适应滑动系数设计实现更精细的损耗控制，为下一代高精度仿真平台提供技术支撑。

参考文献

- [1] 张显,王彩霞,谢开,等. “双碳”目标下中国绿色电力市场建设关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (04): 25-33.
- [2] 胡博,谢开贵,邵常政,等. 双碳目标下新型电力系统风险评述: 特征、指标及评估方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (05): 1-15.
- [3] 别朝红,任彦哲,李更丰,等. “双碳”目标下城市能源系统的形态结构和发展路径 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (17): 3-15.
- [4] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021,(18):50-53.
- [5] 绿色低碳“新引擎”为行业高质量发展注入“新动能” [J]. 环境保护, 2023, 51 (Z2): 6.
- [6] 张海龙.中国新能源发展研究[D].吉林大学,2014.
- [7] 江泽民.对中国能源问题的思考[J].上海交通大学学报,2008,(03):345-359.DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2008.03.001.
- [8] 张显,史连军. 中国电力市场未来研究方向及关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (16): 1-11.
- [9] 张兴,战祥对,吴孟泽,等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (21): 1-15.
- [10] 刘锦坤. 习近平生态文明思想视域下当代生态治理研究——以库布齐沙漠治理为例 [J]. 兵团党校学报, 2019, (04): 38-41.
- [11] 史连军,周琳,庞博,等. 中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (24): 83-89.
- [12] 李凌云,王贺,樊江川,等.新能源渗透下源网荷储灵活性资源配置与调度优化模型[J].煤炭经济研究,2025,45(01):170-176.DOI:10.13202/j.cnki.cer.2025.01.015.
- [13] 杨家全,梁俊宇,黄伟,等.基于参数可行空间的新能源电力系统频率特性统一分析方法[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-12[2025-02-27].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1999.tm.20250120.1432.004.html>.
- [14] 李明,常永康,毛永涛,等.高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J].高电压技术,2024,50(11):4773-4788.DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20241234.

-
- [15] 曾博,杨雍琦,段金辉,等. 新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39 (17): 10-18.
- [16] 张磊,朱凌志,陈宁,等. 风力发电统一模型评述 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (12): 207-215.
- [17] 曾振锋.考虑柔性负荷和 N-1 故障的配电网规划方法[D].南昌大学,2024.DOI: 10.27232/d.cnki.gnchu.2024.002255.
- [18] 王琼.考虑新能源区间不确定性的输配系统静态电压稳定评估与预防控制 [D].华南理工大学,2023.DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2023.002427.
- [19] 康龙.500 kV 主变压器 N-1 故障后断面功率越限控制时间研究[J].湖南电力, 2022,42(04):46-49+74.
- [20] 袁慧涛,袁文涛,王文敬,等.基于阻抗分析法的双馈风电机组经串补线路并网系统的次同步振荡特性研究[J].山东电力技术,2024,51(11):48-60.DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.11.005.
- [21] 李鲁阳,王方政,陈磊,等. 双馈风机对电网频率扰动的动态响应建模与分析 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (09): 75-85.
- [22] 刘志坚,王伟铭,骆军,等.基于 MPC 的虚拟同步双馈风机并网系统次同步振荡抑制策略[J].电机与控制应用,2024,51(11):75-84.
- [23] 杜程茂,杜雄,苏婧媛,等. 定子电流控制的双馈风机导纳建模与次同步振荡风险分析 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (13): 159-167.
- [24] 朱林,钟丹婷,王贝,等. 含转子侧控制器的双馈风机建模与次同步振荡机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (13): 40-48.
- [25] 张阳.双馈风电场等值建模与考虑 SVG 影响的次同步振荡机理及抑制研究 [D].西安理工大学,2024.DOI:10.27398/d.cnki.gxalu.2024.001376.
- [26] 刘皓明,任秋业,张占奎,等. 双馈风机等效惯性时间常数计算及转差率反馈惯量控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (17): 49-57.
- [27] 董晓亮,李江,侯金鸣. 基于双馈风机转子侧变流器的次同步谐振抑制方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (08): 92-97.
- [28] 乔嘉赓,鲁宗相,严慧敏,等. 双馈感应风力发电机功率控制器的建模与仿真 [J]. 电力系统自动化, 2007, (24): 34-37+41.
- [29] Zhang X ,Xie Y ,Xie Q , et al. Optimization Control of Sub-Synchronous Oscillations in Doubly Fed Generators with Wind Turbines Using the Genetic Algorithm [J]. Applied Sciences, 2025, 15 (3): 1353-1353.
- [30] Rink R ,Małkowski R ,Gawin B , et al. Concept and Implementation of Innovative Scalable Wind Turbine Emulator with Doubly Fed Asynchronous

-
- us Machine [J]. *Energies*, 2025, 18 (4): 808-808.
- [31] 孙伟. 变速恒频双馈式异步风力发电机分析[J]. *通信电源技术*, 2019, 36(03): 275-276. DOI:10.19399/j.cnki.tpt.2019.03.113.
- [32] 武磊. 变速恒频双馈异步风力发电机动态功率控制法的研究[D]. 天津理工大学, 2011.
- [33] Marti J R, Louie K W, A phase-domain synchronous generator model including saturation effects[J], *IEEE Trans. Power System*, 1997, 12(1): 222-229.
- [34] Wang L et al, Methods of interfacing rotating machine models in transient simulation programs[J], *IEEE Trans, Power Del*, 2010, 25, (2): 891-903.
- [35] Brandwajn V. Synchronous generator models for the analysis of electromagnetic transients[D], Ph.D. dissertation, Univ, British Columbia, Vancouver, B C Canada, 1977:
- [36] Lauw H K, Meyer W S. Universal machine modeling for the representation of rotating electric machinery in an electromagnetic transients program [J], *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 1982, 101(6): 1342-1351.
- [37] 刘岳坤, 汪娟娟, 王泽昊, 等. 定功率控制下柔性直流输电系统交流侧导纳矩阵建模及频率耦合抑制策略研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43 (10): 3718-3731. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.213242.
- [38] 沈硕, 刘娆, 李晓萌, 等. 基于简化导纳矩阵的快速频率响应分析方法 [J]. *高电压技术*, 2018, 44 (10): 3284-3290. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20180925019.
- [39] 袁慧涛, 袁文涛, 王文敬, 等. 基于阻抗分析法的双馈风电机组经串补线路并网系统的次同步振荡特性研究 [J]. *山东电力技术*, 2024, 51 (11): 48-60. DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.11.005.
- [40] 王振, 王乾坤, 王翰逸, 等. 量子-经典融合算力架构与发展 [J]. *信息通信技术与政策*, 2025, 51 (01): 89-96.
- [41] 李怡辰. VSC 换流器电磁暂态仿真方法研究[D]. 华北电力大学(北京), 2023. DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000636.
- [42] I. S . Switching characteristics of silicon power-controlled rectifiers: I - Turn-on action [J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, 1961, 80 (3): 320-326.
- [43] Istvan S . Switching characteristic of silicon power-controlled rectifiers: II — Turn-off action and dv/dt self-switching [J]. *IEEE Transactions on Communication and Electronics*, 1964, 83 (75): 861-871.

-
- [44]侯延琦.基于 FPGA 的柔性直流实时仿真及其在高频振荡研究中的应用[D].华北电力大学(北京),2023.DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000177.
- [45]王钦盛,王灿,潘学伟,等. 基于 FPGA 的电力电子恒导纳开关模型修正算法及实时仿真架构 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (01): 150-159.
- [46]侯延琦,刘崇茹,郑乐,等.基于负电阻补偿的 VSC 恒导纳建模方法[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6985-6995.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211411.
- [47]冯谟可,王傲群,袁帅,等. 国产化电磁暂态仿真平台发展方向分析及展望 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (10): 64-74.
- [48]Toufan M, Annakkage U D. Simulation of the unified power flow controller performance using PSCAD/EMTDC[J]. Electric power systems research, 1998,46(1): 67-75.
- [49]Szlivka F ,Heteyi C ,Fekete G , et al. Comparison of Mixing Plane, Frozen Rotor, and Sliding Mesh Methods on a Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbine [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (15):
- [50]朱建鑫,滕国栋,秦阳,等. 基于多 FPGA 的电力电子实时仿真系统 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (09): 137-143.
- [51]杨立敏,朱艺颖,郭强,等. 基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真建模及试验 [J]. 电网技术, 2020, 44 (11): 4055-4062. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0910.
- [52]周保荣,房大中,Laurence A.Snider,等. 全数字实时仿真器——HYPERSIM [J]. 电力系统自动化, 2003, (19): 79-82.
- [53]Wu Bin, Lang Yongqiang, Zargari Navid, et al. 风力发电系统的功率变换与控制[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [54]史一博,刘崇茹.基于虚拟阻抗补偿的 PMSG 恒导纳建模方法[J].中国电机工程学报,2024,44(06):2362-2374.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222442.
- [55]侯延琦,刘崇茹,王鑫艳,等.IGBT 开关模块的附加支路恒导纳模型[J].中国电机工程学报,2023,43(06):2381-2392.DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.212764.
- [56]楼冠男,蒋啸宇,顾伟,等. 基于参数化恒导纳方法的多逆变器仿真建模与优化 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (01): 162-171.
- [57]汪涛,虞晓阳,文继锋,等. 模块化多电平柔性直流输电换流器子模块过电压保护 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (21): 107-115.
- [58]于坤山,谢立军,金锐. IGBT 技术进展及其在柔性直流输电中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (06): 139-143.
- [59]沈卓轩,姜齐荣. 电力系统电磁暂态仿真 IGBT 详细建模及应用 [J]. 电力系

统自动化, 2020, 44 (02): 235-247.

- [60]Maguire T, Giesbrecht J. Small Time-Step($\leq 2\mu\text{Sec}$) VSC Model for the Real Time Digital Simulator[C]. IPST International Conference on Power Systems Transients, Montreal, Canada, 2005:1-6