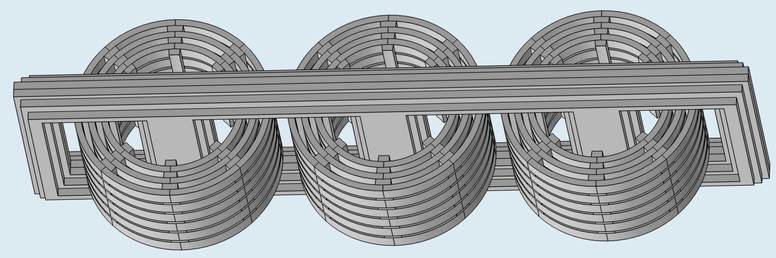
基于 COMSOL 的三主柱特高压变压器短路磁–固耦合建模与应用



陈阳[1]，杨舒然[2]，赵文彬[1]

1. 上海电力大学电气工程学部，上海，中国　2. 上海电力大学数理学院，上海，中国

实测故障录波驱动三维漏磁场计算，追踪电磁载荷向绕组与绝缘支撑结构的传递

1000 kV 单相自耦变压器三主柱主体变

3 套绕组主柱	**9** 个线圈域	**0.2 ms** 录波采样间隔	**0.03 s** 主峰控制时刻

01 研究对象与实测激励

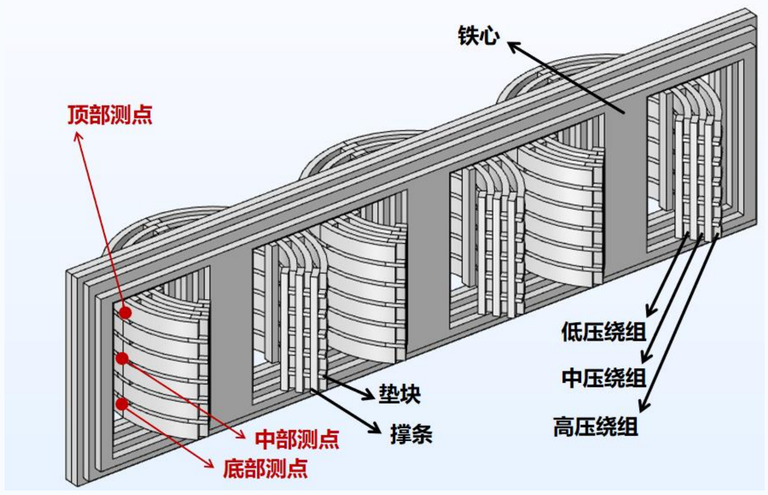


图 1　三主柱主体变结构、绕组与测点示意

研究对象

研究对象为1000 kV等级单相自耦变压器三主柱主体变。模型保留五柱铁心、高中低压绕组、撑条、垫块和主要端部约束，用于描述三维漏磁路径及载荷向绝缘支撑结构的传递。

建模范围与假设

磁准静态场与线弹性结构动力学

磁–固单向耦合，位移不反馈电磁几何

短时冲击阶段不考虑油流与温升反馈

结果用于相对评价与薄弱部位识别

实测激励与输入校核

核对录波极性、互感器变比和采样时间轴

完成端口—绕组电流换算，再按三柱近似均流分配

kA 到 A 的量纲转换只执行一次

检查各柱线圈方向与总安匝关系

02 磁–固耦合建模

从故障录波到结构响应

实测录波 › 电流换算三柱分流 › mf 漏磁场 › J × B 体载荷 › solid 结构响应

核心控制关系

$$B = \nabla \times A \qquad \nabla \times H = J_s + J_e$$

$$f_{em} = J \times B$$

$$\rho\, \partial^2 u/\partial t^2 = \nabla \cdot \sigma + f_{em}$$

局部柱坐标：$f_r = J\varphi Bz$，$fz = -J\varphi B_r$

COMSOL 数值实现

9 个数值型均匀化多匝线圈，线圈几何分析确定导线方向

插值函数保存单柱电流，自变量为 s，函数值为 A

mf.FLtzx、mf.FLtzy、mf.FLtzz 作为solid体载荷

分离求解组织磁势与位移场，采用 BDF 瞬态积分

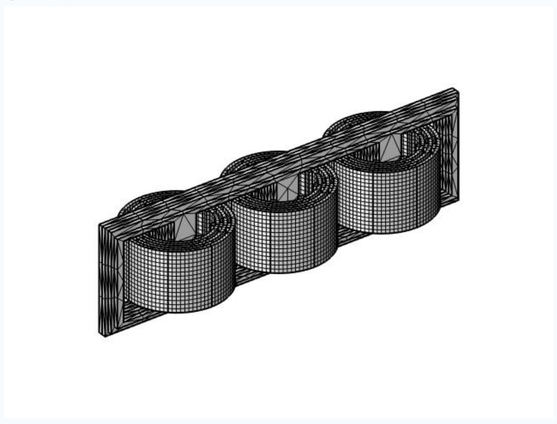


图 2　规则区域扫掠，复杂区域自由四面体，关键界面局部加密

数值分辨率分别核验

空间网格：比较力积分、位移、应力及峰值位置

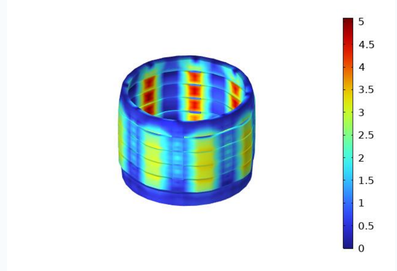
时间离散：区分 0.2 ms 采样、2 ms 输出与内部步长

求解设置：检查相对容差、初始过渡及外域边界

03 关键结果与工程解释



整体结构 | 0.03 s | MPa



低压绕组 | 0.03 s | MPa

0.03 s 各部件峰值应力

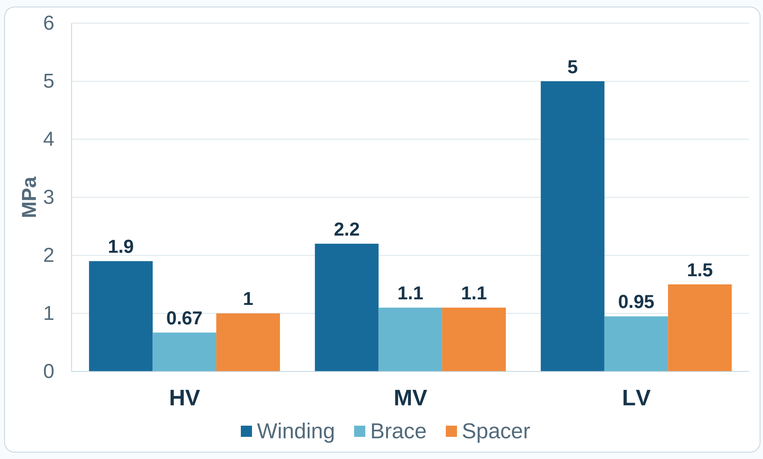


图 3　总结报告中的约值

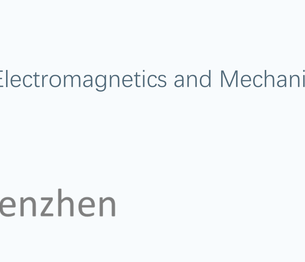
结果解读

0.03 s为主峰控制时刻，0.05 s出现次峰，故障切除后快速衰减

低压绕组峰值约 5.0 MPa，约为中压的 2.3 倍、高压的 2.6 倍

撑条排序为中压侧 > 低压侧 > 高压侧，说明支撑应力并非绕组应力的线性映射

垫块高值集中于承载面、端部和边缘，载荷沿有限接触区域传递



低压侧撑条

高应力主要位于中部至中上部，并沿局部侧面形成间断条带。离散支撑层与接触位置共同决定载荷集中区域。

图 4　低压侧撑条 | 0.03 s | MPa

结论

01

录波、漏磁场、电磁力与结构响应在同一模型中连续传递

02

低压绕组上中部及关键支撑接触层是优先校核区域

03

模型适合工况复现与薄弱部位识别，安全判定仍需材料、接触和预紧参数验证

参考文献

[1] 袁发庭，杨毅，钟浩，等. 短路工况下配电变压器绕组磁场—结构力场耦合特性及累积效应形变特性[J]. 高电压技术，2025，51(10)：5238–5252.

[2] Shan Y., Ai M., Liu W. Research on simulation calculation on short-circuit electrodynamics force of power transformer winding[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 65(3)：451–465.

[3] 周秀，朱洪波，马云龙，等. 不同模型下变压器绕组短路力学特性对比分析[J]. 高压电器，2022，58(01)：148–154.

[4] 王雄博，井永腾，于占洋，等. 基于有限元和解析计算的电力变压器抗短路能力评估方法[J]. 高电压技术，2025，51(09)：4638–4650.