

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.026

MMC 电气设备匝间短路故障时电气参数仿真分析

邹洪森^{1,2}, 孙璐¹, 柴斌³, 刘虹³

(1. 国网宁夏电力有限公司 超高压公司, 宁夏回族自治区 银川 750011;

2. 西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710126;

3. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102200)

摘要:模块化多电平换流器(MMC)作为常用电气设备,其性能影响着电力发电效率。针对 CKGKL-50/10-5% 参数的 MMC 电气设备,以有限元软件 Comsol 建立多电平换流器匝间模型,计算线圈电感和电流数据,并测试得到多电平换流器等效电抗、损耗系数、功率系数等指标。研究结果表明:有限元和解析方法获得电感、电流结果达到了理想吻合程度,推断有限元仿真模型能够获得很高的准确性。多电平换流器匝间短路时会产生更小等效电抗和阻抗,对应等效电抗变化率为-0.12%~-1.76%,等效阻抗变化率为-0.11%~-1.41%。随着短路区域从内层扩展至外层后,多电平换流器参数获得了更大绝对值。该研究能够完成在线监测匝间短路故障的过程,从而有效保护多电平换流器的运行安全。

关键词:多电平换流器;匝间短路;损耗因数;功率因数;参数分析

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0141-04

Simulation Analysis of Electrical Parameters in Inter-turn Short Circuit Fault of MMC Electrical Equipment

ZOU Hongsen^{1,2}, SUN Lu¹, CHAI Bin³, LIU Hong³

(1. Ultra-high Voltage Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;

2. School of Communication Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China;

3. CLP Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC), as a common electrical equipment, its performance affects the efficiency of power generation. For MMC electrical equipment with CKGKL-50/10-5% parameters, the turn to turn model of multilevel converter was built by finite element software Comsol to calculate coil inductance and current data, and the equivalent reactance, loss coefficient and power coefficient of multilevel converter were measured. The results show that the inductance and current obtained by the finite element method and the analytical method are in good agreement, and the accuracy of extrapolating the finite element simulation model is very high. When the multilevel converter turns short circuit, the equivalent reactance and impedance are smaller, corresponding to the equivalent reactance change rate of -0.12% to -1.76%, and the equivalent impedance change rate of -0.11% to -1.41%. As the short circuit area extends from the inner to the outer layer, the multilevel converter parameter gains a larger absolute value. This research can complete the process of on-line monitoring of interturn short circuit fault, so as to effectively guarantee the operation safety of multilevel converter.

Keywords: multilevel converter; interturn short circuit; loss factor; power factor; parameter analysis

0 引言

随着电力设备运行获得更高感性负荷后,需进一步提升无功需求。到目前为止,国内大部分无功补偿设备都是采用电力换流器的成套系统,且系统可以保持较低运行成本^[1-2]。为消除加入电力换流器后引起电网高次谐波增大的现象,同时降低换流器的合闸涌流,应为电力换流器配备

更大电抗率串联多电平换流器^[3-4]。其中,多电平换流器具有线性度高、损耗程度低、力学强度大、无油污、维护过程简单等多项优势^[5]。但同时当它出现严重问题时还会引起火灾发生,极大地增加了变电站的危险性,造成多电平换流器烧毁的后果^[6]。根据以上研究结果可知,通过深入探讨多电平换流器匝间短路故障,特别是综合分析电气参数变化状态,能够促进监测灵敏度的明显

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG22000B)

第一作者简介:邹洪森(1982—),男,湖北宜昌人,高级工程师,硕士,研究方向为特高压换流站换流阀专业技术, zouhongsen112585@163.com。

提升^[7-8]。

到目前为止,已有很多学者开展了电力系统检测方面的研究工作。其中,文献[9]报道了以无线热点测温方法对多电平换流器进行绝缘效果评价的内容,该方法虽然评价多电平换流器匝间绝缘能力,但在实际检测期间需安装大量传感器。因此,大量学者都对多电平换流器匝间短路性能进行了电气量影响因素的研究。文献[10]根据模型解析结果来获得并联多电平换流器的匝间短路电抗、电阻数据,从而获得多电平换流器处于最大等值电阻时的变化状态。采用上述方法虽然能够实现精度控制要求,但需开展大量数据运算。文献[11]通过构建有限元模型分析了多电平换流器短路状态下的短路电流与电动力参数;开展有限元分析时,可以利用磁场-电路耦合方法对多电平换流器工况开展仿真分析,从而保证获得高运算速率与控制精度的前提下实现更低计算量,此外可以充分利用此算法后处理过程获得更直观结果。

本文测试过程在 CKGKL-50/10-5% 多电平换流器上进行。先以有限元软件 Comsol 建立多电平换流器匝间符合绝缘性能要求的数学模型,以上述模型进行计算得到线圈电感和电流数据,并和解析结果进行比较,发现获得了理想的吻合程度,因此可以推断以上模型能够达到准确性控制要求。建立多电平换流器匝间短路模型,并测试得到多电平换流器等效电抗、损耗系数、功率系数等指标,能够完成在线监测匝间短路故障的过程,从而有效保护 MMC 电气设备的运行安全。

1 有限元计算

从图 1 中可以看到采用 Comsol 建立的多电平换流器结构^[12]。

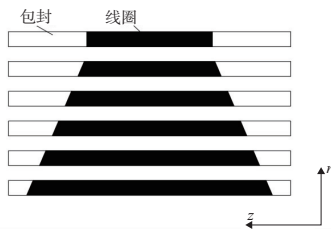


图 1 多电平换流器结构示意图

构建以下的区域控制方程^[13]:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J_e \\ B = \nabla \times S \\ E = -j\omega S \\ J_e = \sigma E + j\omega D \end{cases} \quad (1)$$

式中: H 为磁场强度; J_e 为电流密度; B 为磁通密度; S 为横截面参数; E 为电场强度; D 为电位移矢量; ω 为互感系数; j 为虚部单位。

设计了下述线圈几何表达式:

$$J_e = \frac{N(V_{\text{coil}} + V_{\text{ind}})}{SR_{\text{coil}}} e_{\text{coil}} \quad (2)$$

式中: N 为线圈匝数; V_{coil} 为电压参数; V_{ind} 为感应电压; e_{coil} 为线圈方向矢量。

设定下述线圈电阻 R_{coil} 计算式:

$$R_{\text{coil}} = \int_s \frac{NL}{\sigma_{\text{coil}} a_{\text{coil}} S} \quad (3)$$

式中: L 为线圈总长度; σ_{coil} 为电导率; a_{coil} 为导线横截面积。

等效电感 L_p 为^[14]

$$L_p = \frac{(\omega L_c)^2 L}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4)$$

式中: R 为电阻; L_c 为环形线圈间互感。

2 解析计算法

多电平换流器利用单层线圈并联方式进行组合,假设多电平换流器中存在 m 层线圈,对于多电平换流器达到正常匝间绝缘的情况下^[15],可以建立图 2(a) 等效电路。对于多电平换流器中存在某层线圈匝间短路故障的情况下,建立的多电平换流器等效电路如图 2(b) 所示。

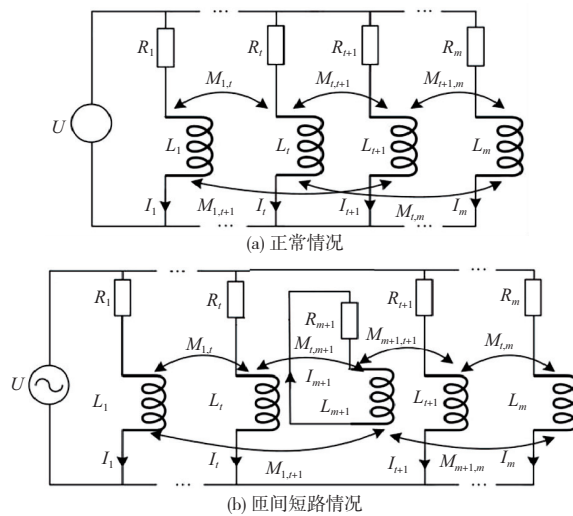


图 2 多电平换流器等效电路图

当匝间绝缘状态未存在异常问题时,可以通过下式表示各层线圈^[16]:

$$(R_i + j\omega L_i) I_i + \sum_{i=1}^{m+1} j\omega M_{i,i} I_i = U_i \quad (5)$$

式中: m 为线圈层数; R_i 为第 i 个分支的电阻; I_i 为

第 i 个分支的电流; L_i 为第 i 个分支的电感; M_i 为第 i 个分支的互感; U_i 为第 i 个分支的电压。

当存在匝间短路故障时,可以建立下述多电平换流器各层线圈函数:

$$(R_{m+1} + j\omega L_{m+1})I_{m+1} + \sum_{i=1}^m j\omega M_{i,m+1}I_{i,m+1} = 0 \quad (6)$$

式中: R_{m+1} 为第 $m+1$ 个分支的电阻; I_{m+1} 为第 $m+1$ 个分支的电流; L_{m+1} 为第 $m+1$ 个分支的电感; M_{m+1} 为第 $m+1$ 个分支的互感。

3 仿真验证

本文针对 CKGKL-50/10-5% 多电平换流器进行了仿真,具体技术指标如表 1 所示。

表 1 多电平换流器主要参数

参数	数值	参数	数值
电压/kV	10	频率/Hz	50
电流/A	157.5	内径/mm	545.0
容量/kvar	50	外径/mm	84.1
相数	1	包封数	4
包封 1 支路数	5	包封 2 支路数	4
包封 3 支路数	4	包封 4 支路数	5

从图 3 与图 4 中可以看到分别以有限元和解析方法确定的不同层号下电感、电流统计结果。根据上述测试结果可知,两种不同算法获得的结

果均达到了理想吻合程度,可以推断有限元仿真模型能够获得很高的准确性。

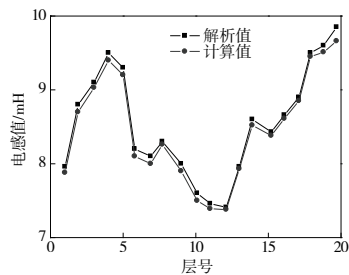


图 3 不同层号下电感结果统计

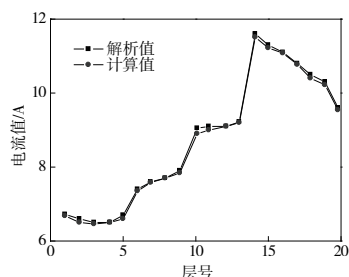


图 4 不同层号下电流结果统计

4 仿真分析

多电平换流器呈现理想的对称结构^[17],本文对线圈轴向高度介于 $H \sim H/2$ 之间的区域设置了匝间绝缘短路故障。在线圈中存在匝间短路的情况下,等效电气参数会发生较大变化,具体如图 5 所示。

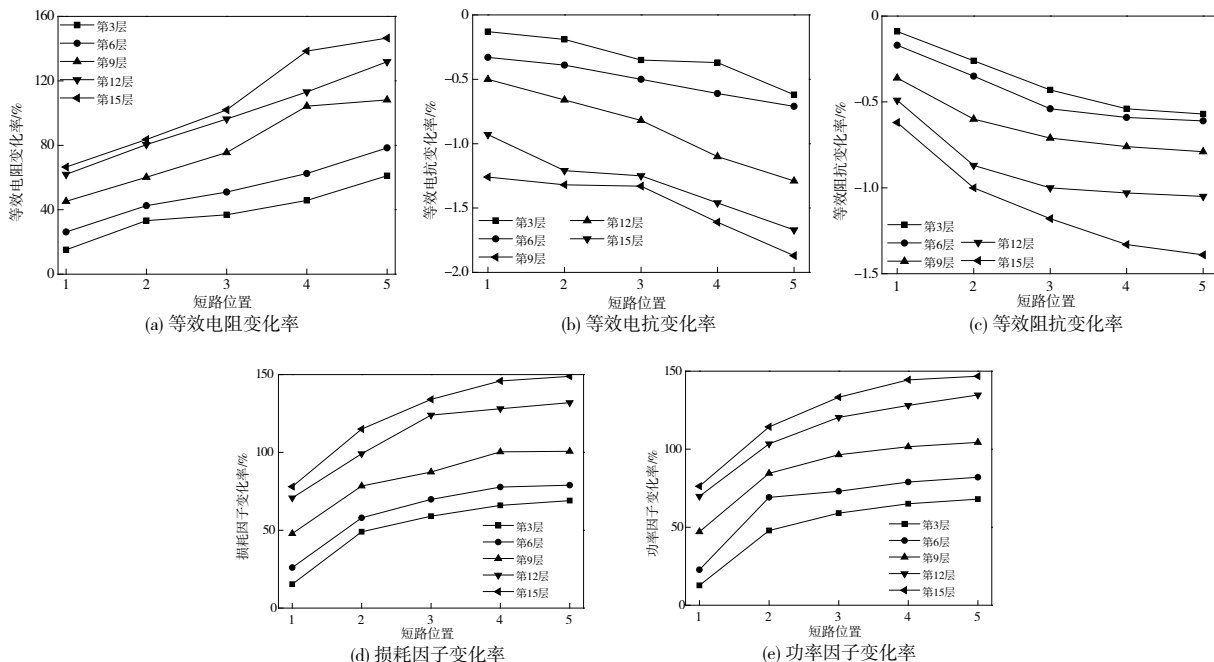


图 5 匝间短路下电气参数变化

对图 5 进行分析可知,在多电平换流器线圈产生匝间短路故障时,将会形成差异很大的等效电阻、等效电抗、等效阻抗、损耗因子和功率因子的变化率,各项变化特征如下。

特征一,当多电平换流器中形成匝间短路时,会产生更小等效电抗和阻抗。这是由于产生的短路环电流与实际线圈电流方向相对应,从而对初始磁场起到去磁的效果。

特征二,等效电阻、功率和损耗系数都形成了更大变化率,总体上上述不同参数都保持相近变化率。根据测试结果可知,等效电阻变化率在 3.12%~153.60% 范围内;对应等效电抗变化率在 -0.12%~-1.76% 范围内;等效阻抗变化率在 -0.11%~-1.41% 范围内;损耗因子变化率在 15.01%~148.50% 范围内;功率因子变化率为 14.60%~145.00% 之范围内。根据径向参数可知,随着短路区域从内层扩展至外层后,各项多电平换流器参数都获得了更大绝对值。产生上述现象的原因是,当故障位置从内层拓展至外层时,故障线圈获得了更高耦合度,引起上述参数快速变化。

5 结语

本文开展了 MMC 电气设备匝间短路故障分析,测试过程在 CKGKL-50/10-5% 多电平换流器上进行,得到如下结论。

1) 有限元和解析方法获得电感、电流结果达到了理想吻合程度,推断有限元仿真模型能够获得很高的准确性。

2) 多电平换流器匝间短路时会产生更小等效电抗和阻抗,对应等效电抗变化率为 -0.12%~-1.76%,等效阻抗变化率为 -0.11%~-1.41%。

3) 等效电阻、功率和损耗系数都形成了更大变化率,随着短路区域从内层扩展至外层后,多电平换流器参数获得了更大绝对值。

以上研究有助于提高 MMC 电气设备的自动化控制效率,有助于保持电力系统运行的稳定性。

参考文献:

[1] 杨定乾,丁杨. 换流器换相脉冲相位分布的仿真及实测分析[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 211-220.
[2] 帅远明,王革鹏. 基于仿真模板的变压器油箱强度计算[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(1): 127-129.

[3] 梅念,王光达,陈钊,等. 模块化多电平换流器子模块关键组部件稳态电流应力全解析化计算[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3712-3720.
[4] 王凯伦,宋强,周月宾,等. 模块化多电平换流器的三轴解耦控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 29-39.
[5] 夏嘉航,王晨欣,展瑞琦,等. 基于主动换相型电流源换流器的远海风电并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4811-4823.
[6] 张延彬,杨晓峰,潘子迅,等. 模块化多电平换流器改进无差拍电流预测控制[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(6): 43-50.
[7] 王渝红,谭子鹏,廖建权,等. 基于附加桥臂电流测量的非隔离型模块化多电平直流变压器差动保护方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(5): 161-167.
[8] 董勋,牛刚. 非平稳工况下感应电机匝间短路与高阻连接诊断[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 767-776.
[9] 尹睿涵,丁国成,杨海涛,等. 基于功率因数法的干式空心电抗器匝间短路故障检测研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 80-85.
[10] 王和杰,徐广鸷,周徐达,等. 干式空心并联电抗器匝间短路状态下损耗分析[J]. 电力与能源, 2018, 39(2): 160-161, 169.
[11] 闫强强,舒乃秋,关向雨,等. 基于电磁-结构场耦合的干式空心电抗器短路电动力计算[J]. 水电能源科学, 2016, 34(2): 186-189.
[12] 张波,王坚俊,韩文芳,等. 干式空心电抗器匝间电弧性短路故障特征提取及诊断方法研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 145-152.
[13] 咸日常,鲁尧,陈蕾,等. 干式空心串联电抗器匝间短路故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 10-16.
[14] 周啸,阳岳希,寇龙泽,等. 模块化多电平柔性直流换流器高频振荡抑制策略与参数优化设计[J]. 中国电力, 2025, 58(1): 50-60.
[15] 廖建权,胡成彬,高仕林,等. 双极面对面模块化多电平换流器型直流变压器快速保护方案[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 187-198.
[16] 胡应宏,李雨,李阳,等. 面向柔直换流站高频谐振问题的换流变压器建模与参数辨识[J]. 电工技术学报, 2024, 39(22): 7154-7166.
[17] 和敬涵,张佳宝,李猛,等. 基于孪生模型的模块化多电平换流器保护[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 119-126.

收稿日期: 2023-12-20