

# 适用于海上风电低频变压器的保护方法研究

高淑萍<sup>1,2</sup>, 贾淘惠<sup>1,2</sup>, 宋国兵<sup>3</sup>, 王晨清<sup>4</sup>, 权喆<sup>1,2</sup>, 周永宁<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 710054, 西安; 2. 西安市电气设备状态监测与  
供电安全重点实验室, 710054, 西安; 3. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安;  
4. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 211103, 南京)

**摘要:** 针对柔性低频输电系统中的变压器差动电流波形畸变导致传统二次谐波制动原理失效的问题。提出一种基于经验模态分解(EMD)与时域投影面积的低频变压器保护新方法。该方法首先利用 EMD 将差动电流自适应分解为一系列本征模态函数(IMF)及残余分量;随后计算各 IMF 分量的时域投影面积,构建故障识别特征量;最后结合理论分析设定判据阈值,实现励磁涌流与区内故障电流的准确识别。基于 PSCAD/EMTDC 搭建海上风电柔性低频输电系统模型并开展仿真验证。结果表明:所提方法在故障后 60 ms 内即可完成准确识别,可靠性明显优于传统方法。在  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  不同合闸角,3%、5%、7%典型谐波畸变率及 20、25、30 dB 高斯白噪声等干扰条件下均未出现误判。提出的方法有效克服了传统方法的缺陷,具有较强的鲁棒性,为海上低频输电系统变压器保护提供了一种可行的方法。

**关键词:** 柔性低频输电系统;低频变压器保护;励磁涌流;经验模态分解;时域投影

**中图分类号:** TM772 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202605018 **文章编号:** 0253-987X(2026)05-0185-09

## Research on Protection Methods for Offshore Wind Power Low-Frequency Transformers

GAO Shuping<sup>1,2</sup>, JIA Taohui<sup>1,2</sup>, SONG Guobing<sup>3</sup>, WANG Chenqing<sup>4</sup>,  
QUAN Zhe<sup>1,2</sup>, ZHOU Yongning<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Xi'an Key Laboratory of Electrical Equipment Condition Monitoring and Power Supply Security, Xi'an 710054, China;  
3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. Research Institute,  
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** To address the issue of waveform distortion in differential currents of transformers within flexible low-frequency transmission systems leading to the failure of traditional second harmonic restraint principles, a novel protection method for low-frequency transformers based on empirical mode decomposition (EMD) and time-domain projection area is proposed. This method first uses EMD to adaptively decompose the differential current into a series of intrinsic mode functions (IMFs) and a residual component. Subsequently, the time-domain projection area of each IMF component is calculated to construct fault identification features. Based on theoretical analysis, threshold criteria are set to accurately distinguish between magnetizing inrush currents

and internal fault currents. A simulation model of an offshore wind power flexible low-frequency transmission system was established using PSCAD/EMTDC for validation. The results show that the proposed method can achieve accurate identification within 60 ms after a fault occurs, demonstrating significantly higher reliability compared to traditional methods. No misjudgment occurs under various interference conditions, including different closing angles from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , typical harmonic distortion rates of 3%, 5%, and 7%, and Gaussian white noise with signal-to-noise ratios of 20, 25, and 30 dB. The proposed method effectively overcomes the shortcomings of traditional approaches, exhibits strong robustness, and provides a feasible solution for transformer protection in offshore low-frequency transmission systems.

**Keywords:** flexible low-frequency transmission system; low-frequency transformer protection; inrush current; empirical mode decomposition; time-domain projection

海上风电作为可再生能源体系中的关键组成部分,凭借其清洁低碳的特性、较高的发电效率、丰富的风能资源储备、不占用陆地空间以及适合大规模开发等优势,已经成为全球能源转型的重要战略领域。目前,海上风电接入陆上工频系统的方式主要包括工频高压交流输电(HVAC)、高压直流输电(HVDC)以及低频交流输电技术(LFAC)等<sup>[1-6]</sup>。在近海区域,风电的输送主要依赖工频交流输电技术,因其结构相对简单、技术成熟且拥有丰富的工程经验。高压直流方案的换流站建设投资较大,但直流海缆输电能力基本不受离岸距离限制,比较适合海上风电的远距离并网情况<sup>[7-9]</sup>。低频交流方案可通过降低运行频率来减小交流海缆的容性效应,而且无需换流站投资,是一种较为合适的远距离海上风电并网方式<sup>[10-12]</sup>,有望成为海上风电输电技术发展的重要方向。

低频变压器作为海上低频输电送出系统的核心设备,其运行可靠性对于整个系统的稳定性十分关键。目前,该领域的研究主要聚焦于磁性材料的选择、磁路设计、效率与损耗等方面。文献[13]分析了频率变化对铁芯材料、磁通密度以及漏磁场分布的影响。文献[14]通过多物理场仿真,优化低频油浸式变压器的温升分布和热点温度。文献[15]提出了针对低频运行条件优化变压器设计的方法,重点考虑了铁芯尺寸、绕组匝数以及绝缘结构的调整,以确保变压器能够在低频环境下高效运行。然而,针对低频变压器的继电保护问题研究很少。由于运行频率降低以及受到系统两侧控制方法的影响,低频变压器励磁涌流、内部故障电流等暂态特性发生显著变化,导致基于工频模型的传统差动保护面临适应性挑战。文献[16]指出,低频变压器在内部故障时

差流的二次谐波含量较高,使得传统二次谐波制动判据失效,易引起保护误动或拒动。因此,研究适用于低频变压器的故障识别新原理与保护新方法亟待解决。

针对上述问题,本文提出了一种基于经验模态分解与时域投影面积的低频变压器保护方法。所提方法以变压器两侧差动电流为分析对象,首先通过经验模态分解,将信号分解为多个本征模态函数分量;进而计算各分量在时域上的投影面积,构建以最大面积占比为核心的特征量;最终通过设定合适阈值,实现励磁涌流与故障电流的准确区分。为验证所提方法的有效性,本文在PSCAD软件中构建了仿真模型,并设置多种典型工况进行测试。结果表明,与传统方法相比,本文方法能够在故障后第一个周波内实现更可靠的故障识别,显著提升低频变压器保护的速动性与可靠性。

## 1 低频输电系统

海上低频输电系统方案如图1所示。在该方案中,海上风机通过背靠背全功率变流器将风电转换为50/3 Hz低频交流电,随后通过海上低频变压器升压,再通过海底电缆将电能输送至模块化多电平矩阵换流器(M3C),进而转换为工频电并入陆上电网。系统两侧隔离变压器均采用Yd接线方法,既有效防止了零序电流的传递又起到了电气隔离的作用,为整个输电系统的安全稳定运行提供了保障。

本文研究使用的海上风电机组采用直驱永磁同步发电机技术,发电单元主要由风力机和永磁同步发电机、机侧整流器、网侧逆变器及相应的控制系统组成。为保证并网电能质量,直驱式风电变流器均采用负序电流抑制控制<sup>[17-18]</sup>。

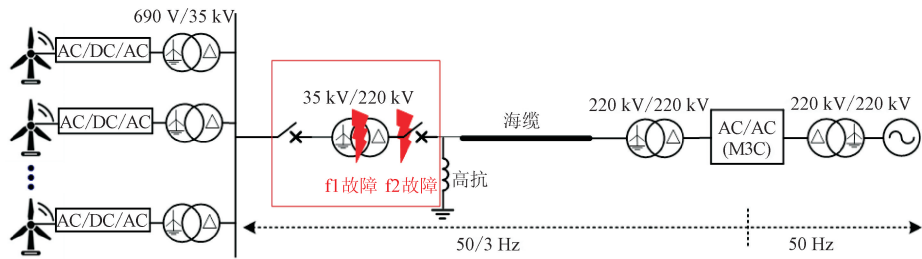


图 1 海上风电低频交流输电系统

Fig. 1 Low-frequency AC transmission system for offshore wind power

M3C 结构包含 9 个桥臂,桥臂的构造均是由电感  $L$  与  $N$  个级联的全桥子模块组成,连接了低频与工频系统,各桥臂中的  $L$  能够在系统发生故障时抑制环流。桥臂与两侧的三相交流系统相连接,形成一个对称的  $3\times 3$  矩阵结构。所有桥臂均采用相同的模块化设计,且参数一致,并且各自独立工作,因此可以将其划分为 a、b、c 3 个子转换器,同时从输出侧来看,它又可以被视作 u、v、w 3 个子转换器。在海上风电低频输电系统中,M3C 采用  $V/f$  动态降压控制策略,为系统提供稳定的交流电压支撑,同时抑制由于负序电流产生的非故障相过电压。为了消除工频侧对低频侧的耦合影响,M3C 还采用了双  $dq$  轴变换控制策略<sup>[19-21]</sup>。

2 低频变压器故障特征

风电场应满足低电压穿越的并网要求,这一要求使得风电场短路电流特征发生改变,进而显著影响其送出变压器的差动保护性能<sup>[22-24]</sup>,并且海上风电低频输电系统局部已实现 100% 电力电子化。受双侧电力电子型电源控制策略的直接影响,低频变压器的故障特征与常规变压器存在显著差异,导致传统变压器保护方案难以适配,无法满足其保护需求。

二次谐波制动是电力系统变压器差动保护的核心技术之一,核心原理是依据差动电流中的二次谐波含量识别励磁涌流,从而实现保护功能的精准触发。变压器励磁支路具有非线性磁化特性,当变压器合闸或系统电压骤变时,励磁涌流波形严重畸变,含有较大的直流分量及显著的二次谐波成分;而内部故障引起的差动电流则以基波分量为主,二次谐波含量相对较低。这一特性差异构成了二次谐波制动方案的识别基础,保护判据如下

$$K = \frac{I_2}{I_1} \times 100\%$$

(1)

式中:  $I_2$  和  $I_1$  分别为电流二次谐波幅值与基波幅值,  $K$  为差流二次谐波含量。

制动判据为

$$K \geq K_{th}$$

(2)

式中:  $K_{th}$  为二次谐波制动阈值。阈值一般设置为 15%,当满足式(2),判定为励磁涌流,触发制动回路,闭锁差动保护;反之判定为变压器内部故障,差动保护跳闸。

当低频变压器在 1.0~1.5 s 发生区内单相接地故障时,差动电流的二次谐波(100/3 Hz)含量以及谐波频谱图如图 2、图 3 所示。

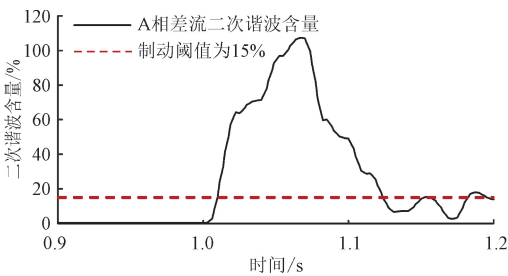


图 2 A 相差流二次谐波含量

Fig. 2 A-phase differential current second harmonic content

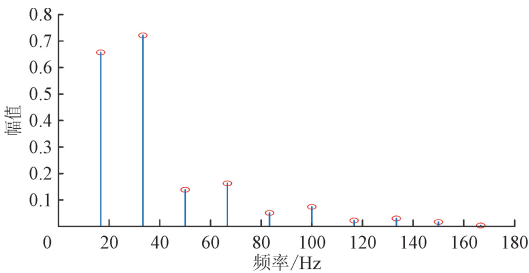


图 3 A 相差流谐波幅频图

Fig. 3 Harmonic amplitude-frequency spectrum of phase A differential current

由图 2 可以看出,当变压器发生区内单相接地故障时,差流二次谐波含量远远高于整定值,导致保

护闭锁,直到故障发生 105 ms 后保护才能动作。图 3 表明了低频变压器发生故障时产生大量谐波分量。在不同运行状况且差流在 1.00~1.06 s 内,低频变压器二次谐波含量以及二次谐波制动结果如表 1 所示。由表 1 的结果可以看出,传统的二次谐波制动不适用于低频变压器保护。

表 1 不同工况下低频变压器二次谐波制动结果  
Table 1 Results of second harmonic braking of low-frequency transformers under different operating conditions

| 运行状况 | 二次谐波含量/% | 制动结果 |
|------|----------|------|
| 单相接地 | >15      | 错误动作 |
| 两相接地 | >15      | 错误动作 |
| 相间故障 | >15      | 错误动作 |
| 三相故障 | >15      | 错误动作 |
| 空载合闸 | >15      | 正确动作 |

3 低频变压器保护方法

目前,基于信号分析的识别方法主要依赖于傅里叶变换与小波变换。然而,傅里叶变换作为一种全局频域分析方法,难以捕捉信号的局部时域特征,而励磁涌流的非平稳特性恰恰要求在时频域内进行精细分析。小波变换虽具备一定的时频局部化能力,但其分析效果在很大程度上依赖于小波基函数的预先选择,这种主观性可能导致特征提取结果的不稳定。为了解决这两种方法的不足,本文提出使用经验模态分解来处理差动电流信号。

3.1 经验模态分解基本原理

经验模态分解的核心思想是,自适应地将一个复杂、非平稳的信号  $x(t)$  分解为一组数量有限的本征模态函数  $h_i(t)$  与一个余项  $r_n(t)$  之和。其本质是“筛分”的迭代过程,将信号中不同时间尺度的波动或趋势逐级分离出来,表达式如下

$$x(t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) + r_n(t) \tag{3}$$

式中:  $i$  表示单个 IMF 分量;  $n$  表示 IMF 分量的总数。

在处理信号时,识别其所有的局部极大值和极小值点,利用三次样条插值法连接所有的极值点形成上、下包络线,计算上、下包络线的瞬时平均值求出包络线的平均值  $m_1(t)$  如下

$$m_1(t) = \frac{1}{2}[v_1(t) + v_1(t)] \tag{4}$$

式中:  $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$  为信号上、下包络线。

求取 IMF 分量初始值  $h_1(t)$

$$x(t) - m_1(t) = h_1(t) \tag{5}$$

在整个信号长度上,极值点的数量(包括极大值和极小值)与过零点的数量必须相等,或最多相差一个。在任意时间点,由局部极大值定义的上包络线和由局部极小值定义的下包络线的均值为 0。

如果  $h_1(t)$  同时满足以上两个分量要求,该信号就是第 1 个 IMF 分量;如果不满足,以该信号为基础,重新做分析。IMF 分量的获取通常需要若干次的迭代

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \\ h_{12}(t) = h_{11}(t) - m_{12}(t) \\ \vdots \\ h_{ik}(t) = h_{i(k-1)}(t) - m_{ik}(t) \end{cases} \tag{6}$$

式中:  $k$  表示重复分解次数。但是,分解过程不是没有限制的,利用  $S_D$  来进行限制

$$S_D = \sum_{t=0}^r \left| \frac{h_{1(k-1)} - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right|^2 \tag{7}$$

$S_D$  通常取值为 0.2~0.3。当  $h_{1k}$  满足该条件即记第 1 个 IMF 分量为

$$h_{1k} = C_1 \tag{8}$$

当得到满足要求的第 1 个 IMF 分量后,即可求取残余分量  $r_1(t)$

$$x(t) - C_1 = r_1(t) \tag{9}$$

将求得的  $r_1(t)$  视为新的信号重复上述步骤,得到剩余的 IMF 分量。当  $r(t)$  趋于单调趋势分解完成,即为式(3)所示。

3.2 IMF 分量时域面积计算

为精准量化各 IMF 分量对原始信号的贡献程度,通过计算其在时间轴上的投影面积,获取各分量在原始信号能量分布中的总体占比

$$S_{hi} = \int_{t_0}^{t_n} |h_i(t)| dt \tag{10}$$

$$S_r = \int_{t_0}^{t_n} |r_n(t)| dt \tag{11}$$

式中:  $S_{hi}$  和  $S_r$  分别为 IMF 分量和残差绝对值的积分;  $t_0 \sim t_n$  为发生故障后第 1 个周期时间窗。

在信号分析窗口的选择上,本文以故障特征提取的时效性与完整性为原则,选取故障发生后一个周期的时间作为分析窗口即 1.00~1.06 s,用于计算 IMF 分量在该时段内的整体特征值,确保既能及时捕捉故障暂态信息,又能完整覆盖故障特征周期。



3.3 保护判据

利用式(7),定义 IMF 分量  $h_i$  的比重系数为

$$K_{h_i} = \frac{S_{h_i}}{\sum_{k=1}^n S_{h_k} + S_r} \tag{12}$$

式中:  $K_{h_i}$  是 IMF 分量占整个信号的面积比率。保护判据为

$$K_{\max} \geq K_{zd} \tag{13}$$

式中:  $K_{\max}$  为单个 IMF 对应的  $K_{h_i}$  的最大值;  $K_{zd}$  为判别能量集中度的整定值。

由于励磁涌流富含大量的二次谐波与直流分量,经分解得到的 IMF 分量呈现出能量分布离散的特性,致使其主导投影面积占比相对较小。相较而言,故障电流 IMF 分量能量更为集中,对应主导投影面积占比显著增大。分解出的每个 IMF 分量有相对集中的瞬时频率,选取频带位于  $2f_0$  ( $100/3$  Hz)附近的 IMF 分量,即可视作广义二次谐波分量,选取位于  $f_0$  ( $50/3$  Hz)附近的 IMF 分量,即为广义基波差流量。

根据 IMF 分量占原始信号在时间轴上的投影总面积比值的定义,  $K_{h_i}$  计算结果应在  $[0,1]$  之间。基于上述特征分析,考虑到保护的可靠性,折中取能量集中与能量分散的临界阈值为 0.5。此外,保护整定过程中应考虑可靠系数  $K_{rel}$  <sup>[25]</sup>,因此判别阈值  $K_{zd}$  计算公式为

$$K_{zd} = 0.5K_{rel} \tag{14}$$

式中:可靠系数  $K_{rel}$  一般取  $1.1 \sim 1.2$ ,本文取为 1.1。因此,判别阈值  $K_{zd} = 0.55$ 。

当差流信号经计算满足式(13)时,判定为故障电流;反之,则识别为励磁涌流。仿真测试结果表明,该阈值的设定能够有效区分励磁涌流与故障电流。

3.4 保护算法流程图

基于 EMD-IMF 时域投影面积法的低频变压器保护方法的流程图如图 4 所示。

4 仿真分析

在 PSCAD 仿真软件中搭建图 1 所示的海上风电低频输电系统模型,设定了两类典型故障场景: f1 为变压器绕组匝间故障, f2 为变压器区内故障。故障于 1 s 触发,持续作用至 1.5 s 结束,计算数据窗口为 1.00~1.06 s。模型中的低频变压器具体参数详见表 2。

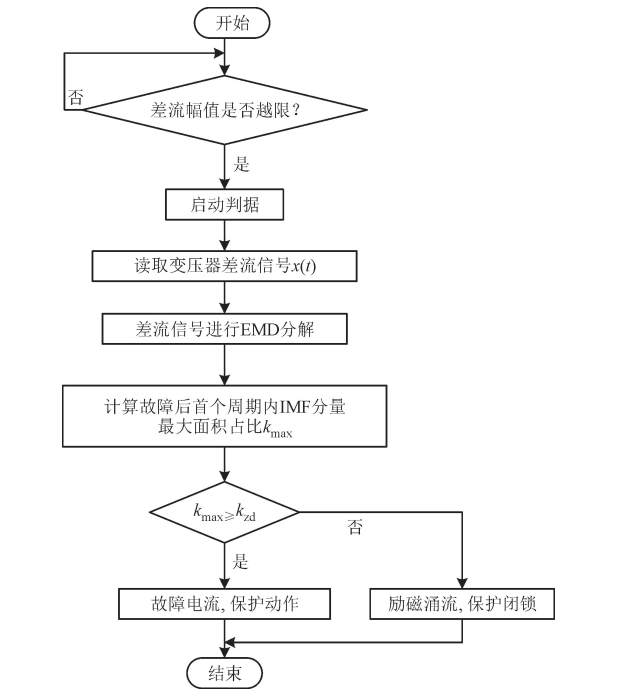


图 4 低频变压器保护方法流程  
Fig. 4 Protection flowchart of low-frequency transformers

| Table 2 Parameters of low-frequency transformer |         |
|-------------------------------------------------|---------|
| 参数                                              | 数值和方式   |
| 额定容量/(MV·A)                                     | 100     |
| 额定频率/Hz                                         | 50/3    |
| 额定电压/kV                                         | 35/220  |
| 接线方式                                            | YND11   |
| 铜损耗                                             | 0.007 1 |
| 空载铁芯损耗                                          | 0.105   |

模拟变压器空载合闸产生励磁涌流,对其 A 相电流信号进行分析,结果如图 5 所示。

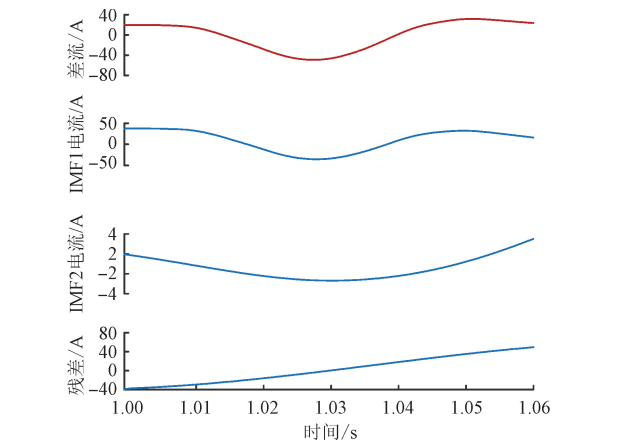


图 5 空载合闸 A 相差流 EMD 分解结果  
Fig. 5 EMD decomposition result of differential current with no-load closing A-phase

由图 5 可以看出,励磁涌流经过 EMD 分解产生两个 IMF 分量,残差呈现单调递增状态,分量 1 的面积于残差面积占比较大,分量 2 面积较小。

模拟变压器发生区内单相接地故障和相间故障,对其 A 相电流信号进行分析,结果如图 6 所示。由图 6 看出,区内故障的 A 相电流经过 EMD 分解产生 1 个 IMF 分量,残差呈现单调递减状态。

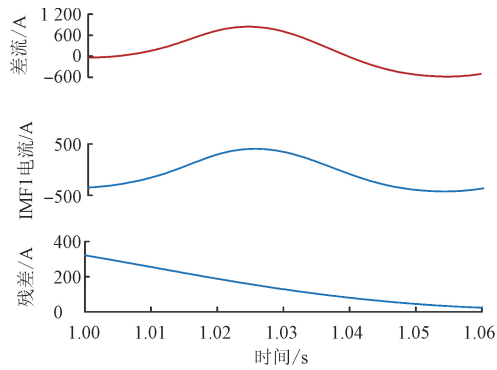


图 6 A 相接地故障 A 相差流 EMD 分析  
Fig. 6 Differential current EMD analysis of phase A for A-phase grounding fault

变压器不同工况下的三相电流  $K_{\max}$  具体如表 3 所示。

表 3 变压器不同运行状态下的三相电流  $K_{\max}$   
Table 3 Three-phase current  $K_{\max}$  of transformer under different operating conditions

| 运行状况 | 相序 | $K_{\max}$ |
|------|----|------------|
| 空载合闸 | A  | 0.439      |
|      | B  | 0.390      |
|      | C  | 0.508      |
| 匝间故障 | A  | 0.584      |
|      | B  | 0.682      |
|      | C  | 0.906      |
| AG   | A  | 0.651      |
|      | B  | 0.948      |
|      | C  | 0.983      |
| AB   | A  | 0.683      |
|      | B  | 0.688      |
|      | C  | 0.916      |
| ABG  | A  | 0.598      |
|      | B  | 0.691      |
|      | C  | 0.735      |
| ABCG | A  | 0.798      |
|      | B  | 0.784      |
|      | C  | 0.572      |

注:AG 表示变压器 A 相接地故障,AB 表示 AB 两相相间故障,以此类推。

受限于文章篇幅,本文重点展示空载合闸和 A 相接地故障两种典型工况下 A 相差动电流的经验模态分解特征。由表 3 数据可以看出:空载合闸工况下,三相电流的  $K_{\max}$  均低于阈值,而变压器区内故障时三相电流  $K_{\max}$  均显著满足判据式(13)。本文方法通过分析故障后首个低频周期内的主导 IMF 分量面积占比,可准确区分励磁涌流与内部故障电流,实现保护装置在暂态过程中的可靠动作。

4.1 不同合闸角对识别方法的影响

合闸时电压的初相角直接影响铁芯中磁通的瞬态过程。如果在电压过 0 时合闸,铁芯中的磁通会达到最大值,从而容易导致铁芯饱和,产生很大的涌流。如果在电压峰值时合闸,则磁通从 0 开始,不会产生瞬态冲击,涌流很小。为探究合闸角度对本文方法识别励磁涌流性能的影响,设置 0°、30°、60°及 90°合闸初相角,系统性分析保护方法在复杂电磁暂态过程下的识别准确性与可靠性。仿真结果如表 4 所示,该数据为评估合闸角度对保护性能的影响提供了量化依据。

表 4 变压器不同合闸角度时的三相电流  $K_{\max}$   
Table 4 Three-phase current  $K_{\max}$  of transformer at different closing angles

| 合闸角度/(°) | 相序 | $K_{\max}$ |
|----------|----|------------|
| 0        | A  | 0.439      |
|          | B  | 0.390      |
|          | C  | 0.508      |
| 30       | A  | 0.419      |
|          | B  | 0.612      |
|          | C  | 0.358      |
| 60       | A  | 0.574      |
|          | B  | 0.296      |
|          | C  | 0.348      |
| 90       | A  | 0.355      |
|          | B  | 0.464      |
|          | C  | 0.452      |

在三相变压器合闸暂态过程中,由于三相电压相位互差 120°,各相铁芯饱和程度存在差异,可能出现某一相磁通快速进入稳态,导致该相不产生显著励磁涌流的特殊工况。因此,当三相中有任何两相的差流信号的 IMF 分量比重系数不满足判据式(13),判定当前状态为励磁涌流,可以有效避免因单相信号特征缺失导致的误判<sup>[26]</sup>。由表 4 可知,在不同合闸角度下,本文方法依旧可以准确识别故障电流与励磁涌流。

4.2 抗噪声性能分析

为评估本文方法的抗干扰能力,在仿真模型中向原始差流信号分别注入信噪比为 20、25、30 dB 的高斯白噪声,系统研究噪声对保护性能的影响。加入噪声干扰后低频变压器不同运行工况下的结果如表 5 所示。

表 5 变压器不同噪声影响下的三相电流  $K_{\max}$   
Table 5 Three-phase current  $K_{\max}$  of transformer under different noise influence

| 运行状况 | 相序 | $K_{\max}$ |       |       |
|------|----|------------|-------|-------|
|      |    | 20 dB      | 25 dB | 30 dB |
| 空载合闸 | A  | 0.402      | 0.423 | 0.432 |
|      | B  | 0.325      | 0.326 | 0.239 |
|      | C  | 0.474      | 0.526 | 0.534 |
| AG   | A  | 0.597      | 0.591 | 0.647 |
|      | B  | 0.746      | 0.847 | 0.808 |
|      | C  | 0.796      | 0.888 | 0.855 |
| AB   | A  | 0.610      | 0.642 | 0.592 |
|      | B  | 0.628      | 0.568 | 0.651 |
|      | C  | 0.770      | 0.821 | 0.866 |
| ABG  | A  | 0.591      | 0.651 | 0.566 |
|      | B  | 0.686      | 0.657 | 0.710 |
|      | C  | 0.614      | 0.635 | 0.674 |
| ABCG | A  | 0.659      | 0.664 | 0.572 |
|      | B  | 0.700      | 0.740 | 0.765 |
|      | C  | 0.607      | 0.590 | 0.599 |

由表 5 可知,在叠加 25、30、35 dB 高斯白噪声的典型干扰场景下,本文方法可在变压器合闸后的首个电气周期内,快速且准确地实现故障电流与励磁涌流的可靠区分。有效克服了噪声干扰对信号特征的影响,验证了此方法在复杂电磁暂态过程中的强鲁棒性与高可靠性。

4.3 抗谐波干扰性能分析

实际电力系统中,差动电流不可避免地受到来自并网点、电力电子装置及非线性负荷等引起的高次谐波畸变影响。为评估所提基于 EMD 与时域投影面积判据在谐波畸变条件下的适应性,本文在励磁涌流及内部故障差动电流上叠加多种典型复合谐波工况进行对比分析。选 3、5、7 次谐波作为代表性分量,并考虑 3 次谐波占主导,5、7 次谐波次之的非等幅分布形式,通过幅值归一化,控制 3、5、7 次谐波的总谐波畸变率分别为 3%、5%和 7%,对应轻度、典型及

重度畸变水平,以检验本文方法在复合谐波背景下的鲁棒性及阈值选取的合理性,结果如表 6 所示。

表 6 变压器不同谐波影响下的三相电流  $K_{\max}$   
Table 6 Three-phase current  $K_{\max}$  of transformer under harmonics Influence

| 运行状况 | 相序 | $K_{\max}$ |       |       |
|------|----|------------|-------|-------|
|      |    | 3%         | 5%    | 7%    |
| 空载合闸 | A  | 0.445      | 0.452 | 0.459 |
|      | B  | 0.405      | 0.403 | 0.347 |
|      | C  | 0.480      | 0.476 | 0.479 |
| AG   | A  | 0.648      | 0.566 | 0.571 |
|      | B  | 0.809      | 0.729 | 0.619 |
|      | C  | 0.930      | 0.903 | 0.893 |
| AB   | A  | 0.678      | 0.649 | 0.648 |
|      | B  | 0.676      | 0.646 | 0.642 |
|      | C  | 0.931      | 0.942 | 0.945 |
| ABG  | A  | 0.583      | 0.574 | 0.576 |
|      | B  | 0.713      | 0.709 | 0.709 |
|      | C  | 0.685      | 0.670 | 0.664 |
| ABCG | A  | 0.752      | 0.614 | 0.603 |
|      | B  | 0.648      | 0.559 | 0.691 |
|      | C  | 0.620      | 0.619 | 0.618 |

由表 6 可知,在初始差动电流上叠加多种典型复合谐波工况,在故障发生后的首个周期内本文方法仍可准确识别内部故障电流与励磁涌流。

5 结 论

针对低频变压器保护存在的问题。本文提出了采用基于 EMD-IMF 时域投影面积法的低频变压器保护方法,得到如下结论。

(1) 在海上低频输电系统中,变压器铁芯磁饱和特性与常规工频系统存在差异,导致励磁涌流和故障电流的谐波分布特性改变。传统二次谐波制动存在拒动风险。

(2) 本文方法首周期内即可有效区分励磁涌流与不同类型故障,具有较好的速动性。

(3) 本文方法不受合闸角度以及噪声与谐波的影响,可以准确可靠实现保护,具有较好的实用价值和工程应用前景。

参考文献:

[1] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.

- WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [2] 吴磊. 海上风电技术发展综述 [J]. 机械制造, 2024, 62(10): 1-15.
- WU Lei. Development overview of offshore windpower technology [J]. Machinery, 2024, 62(10): 1-15.
- [3] 谢非, 申璞, 李致尧, 等. 海上风电柔性直流和低频交流并网方案经济性分析 [J]. 电工技术, 2025(9): 7-11.
- XIE Fei, SHEN Pu, LI Zhiyao, et al. Economic analysis of flexible DC and low-frequency AC grid-connected schemes for offshore wind power [J]. Electric Engineering, 2025(9): 7-11.
- [4] YU Lujie, FU Ziyu, LI Rui, et al. DRU-HVDC for offshore wind power transmission; a review [J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(13): 2080-2101.
- [5] DAKIC J, CHEAH-MANE M, GOMIS-BELLMUNT O, et al. Low frequency AC transmission systems for offshore wind power plants; design, optimization and comparison to high voltage AC and high voltage DC [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107273.
- [6] 蔡旭, 杨仁炘, 周剑桥, 等. 海上风电直流送出与并网技术综述 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
- CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [7] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望 [J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
- LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [8] PAULO S M, ALMEIDA A D O, ALMEIDA P M D, et al. Control of an offshore wind farm considering grid-connected and stand-alone operation of a high-voltage direct current transmission system based on multilevel modular converters [J]. Energies, 2023, 16(16): 5891.
- [9] 黄明煌, 王秀丽, 刘沈全, 等. 分频输电应用于深远海风电并网的技术经济性分析 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 167-174.
- HUANG Minghuang, WANG Xiuli, LIU Shenquan, et al. Technical and economic analysis on fractional frequency transmission system for integration of long-distance offshore wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 167-174.
- [10] 黄阳, 陶永政, 孔志达, 等. 海上风电柔性低频输电系统的技术经济分析 [J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4865-4875.
- HUANG Yang, TAO Yongzheng, KONG Zhida, et al. Techno-economic analysis of flexible low-frequency transmission system for offshore wind farm integration [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4865-4875.
- [11] 汪大洋, 刘宗焯, 李沛, 等. 基于模块化多电平矩阵换流器的海上风电分频系统经济性分析 [J]. 分布式能源, 2018, 3(2): 16-22.
- WANG Dayang, LIU Zongye, LI Pei, et al. Economic analysis of fractional frequency transmission system for offshore wind farm based on modular multilevel matrix converter [J]. Distributed Energy, 2018, 3(2): 16-22.
- [12] MENG Yongqing, YAN Shuhao, WU Kang, et al. Comparative economic analysis of low frequency AC transmission system for the integration of large offshore wind farms [J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1955-1968.
- [13] 王巧媛, 贾少锋, 梁得亮, 等. 柔性输电用低频变压器电磁分析与多目标优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 216-224.
- WANG Qiaoyuan, JIA Shaofeng, LIANG Deliang, et al. Electromagnetic analysis and multi-objective optimization design of low-frequency transformer for flexible power transmission [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 216-224.
- [14] 王巧媛, 贾少锋, 梁得亮, 等. 基于多物理场仿真的低频变压器温度特性分析及导向结构优化 [J]. 高压电压技术, 2024, 50(5): 2009-2019.
- WANG Qiaoyuan, JIA Shaofeng, LIANG Deliang, et al. Temperature characteristics analysis and guide structure optimization of low-frequency transformer based on multi-physics field simulation [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2009-2019.
- [15] 陈飞, 宋磊, 孙业荣, 等. 风力发电低频输电用变压器的关键技术 [J]. 变压器, 2022, 59(12): 23-27.
- CHEN Fei, SONG Lei, SUN Yerong, et al. Key technologies of low-frequency transmission transformers for wind power generation [J]. Transformer, 2022, 59(12): 23-27.



- [16] 顾乔根, 张晓宇, 吕航, 等. 基于故障负序分量的低频变压器快速差动保护 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 184-192.
- GU Qiaogen, ZHANG Xiaoyu, LYU Hang, et al. Fast differential protection of low-frequency transformer based on fault negative sequence component [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 184-192.
- [17] 林进钿, 倪晓军, 裘鹏. 柔性低频交流输电技术研究综述 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 42-50.
- LIN Jindian, NI Xiaojun, QIU Peng. Review of flexible low-frequency AC transmission technology [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 42-50.
- [18] 杨柏旺, 余阳阳, 赵德勇, 等. 直驱永磁同步风力发电系统双PWM控制策略 [J]. 微特电机, 2014, 42(11): 76-80.
- YANG Baiwang, SHE Yangyang, ZHAO Deyong, et al. Double PWM control strategy of direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system [J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(11): 76-80.
- [19] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之一:  $M^3C$  的数学模型与等效电路 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 13-21.
- XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 1 mathematical model and equivalent circuit of  $M^3C$  [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 13-21.
- [20] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之二:  $M^3C$  的稳态特性与主回路参数设计 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 22-29.
- XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 2 the steady-state characteristics of  $M^3C$  and the design of main circuit parameters [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 22-29.
- [21] 徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之三:  $M^3C$  基本控制策略与子模块电压平衡控制 [J]. 浙江电力, 2021, 40(10): 30-41.
- XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 3 basic control strategy for the  $M^3C$  and sub-module voltage balance control [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10): 30-41.
- [22] SHUKLA S, MISHRA S, SINGH B. Empirical-mode decomposition with Hilbert transform for power-quality assessment [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2159-2165.
- [23] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三): 风电场送出变压器保护性能分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 1-8.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [24] 史艳刚, 朱海勇, 陆立文, 等. 低频输电系统控制对差动保护影响及优化策略 [J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 160-169.
- SHI Yangang, ZHU Haiyong, LU Liwen, et al. Influence of low-frequency transmission system control on differential protection and optimization strategy [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(3): 160-169.
- [25] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 经柔性高压直流输电并网的海上风电送出线路拟功率和、差波形比较式纵联保护 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 62-69.
- LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Quasi-power sum and differential waveform comparison type pilot protection for VSC-HVDC grid-connected offshore wind power outgoing line [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 62-69.
- [26] 陈达壮. 基于EMD方法的变压器励磁涌流识别 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

(编辑 杜秀杰)