

基于动力学模型的高压变频器暂态电磁涡流补偿

刘立忠,姜慧武,郑小翠

(江山海维科技有限公司,浙江江山 324100)

摘要:针对高压变频器暂态电磁涡流补偿受电磁散射影响,导致变频器输出迭代误差较大的问题,设计一种基于动力学模型的高压变频器暂态电磁涡流补偿方法。采用动力学模型分析高压变频器暂态电磁散射特征,通过迭代误差方法确定分段区间,在此区间内完成电磁涡流误差补偿,通过D/A数模转换器确定误差补偿准确度,确定其误差补偿准确度可达到谱仪的设计要求,实现高压变频器暂态电磁涡流输出误差补偿。实验结果表明:该方法性能稳定,具有非常高的补偿效率。

关键词:动力学模型;高压变频器;暂态电磁涡流;电磁散射;分段迭代

中图分类号:TM153 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0225-03

Transient Electromagnetic Eddy Current Compensation of High Voltage Inverter Based on Dynamic Model

LIU Lizhong, JIANG Huiwu, ZHENG Xiaocui

(Jiangshan Haiwei Technology Co., Ltd., Jiangshan 324100, China)

Abstract: Owing to the fact that the transient electromagnetic vortex compensation of high-voltage frequency converter is affected by electromagnetic scattering, which leads to a large iterative error of the inverter output, a transient electromagnetic vortex compensation method of high voltage frequency converter is designed. The kinetic model is used to analyze the transient electromagnetic scattering characteristics of the high voltage frequency converter, determine the segmentation interval through the iterative error method for completing the electromagnetic vortex error compensation, clarify the error compensation accuracy through the D/A digital mode converter, determine the error compensation accuracy capable of meeting the design requirements of the spectrometer, and realize the transient electromagnetic vortex output error compensation of the high voltage frequency converter. Experimental results show that the proposed method is stable with very high compensation efficiency.

Keywords: kinetic model; high voltage inverter; transient electromagnetic eddy current; electromagnetic scattering; piecewise iteration

0 引言

由于当前对于高压变频器的研究关键点大多围绕在其主电路设计等方向,而对于其暂态电磁涡流补偿方向的研究甚少,然而依据以往的实践经验可知^[1],高压变频器是否可平稳有效地运行,同样受其暂态电磁涡流的影响,因而对于高压变频器暂态电磁涡流补偿的研究也至关重要^[2]。在高压变频器运行过程中,因磁场的电磁散射易产生高压变频器暂态电磁涡流,影响其电流输出及正常运行。为研究高压变频器暂态电磁涡流补偿,应先对其影响因素电磁散射予以分析求解^[3-4]。

动力学模型能够实现对电磁散射特征的有效分析,可以提升目标检测与显著性等问题的处理效果,降低不同算法的繁琐性,有效节省算法的运算时间^[5]。因此,提出一种基于动力学模型的高压变频器暂态电磁涡流补偿方法,

提升高压变频器输出电压与电流的稳定性,实现高压变频器的平稳安全运行。

1 暂态电磁涡流误差补偿

1.1 基于动力学模型的电磁散射特征

在高压变频器系统中,所需的高压变频器磁场的产生可采用向高压变频器线圈上增加高压变频器电流的方式实现^[6-7]。

由不同金属导体材料包裹的高压变频器线圈,在高压变频器磁场出现电磁散射时易产生高压变频器暂态电磁涡流,此涡流通过一种近似多时间常数的 f 指数衰减,可对高压变频器暂态电磁涡流予以补偿。先分析并求得其形成因素,电磁散射动力学模型如图1所示。

第一作者简介:刘立忠(1968—),男,浙江江山人,高级工程师,高级工业设计师,本科,研究方向为变压器设计技术、电气传动技术、高低压开关柜设计及电气智能化控制技术等。

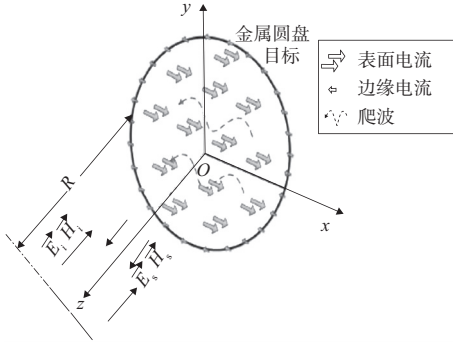


图1 电磁散射的动力学模型

图1中, E_i 为入射电场; H_i 为入射磁场; E_s 为散射电场; H_s 为散射磁场。

以求解高压变频器电场积分方程 (electric field integral equation, EFIE) 为例, 其公式为

$$F_j(u) = t(iC + \varepsilon) \quad (1)$$

式中: t 表示变频器电场做功时间; C 表示电场强度; i 表示变化系数; ε 表示运行误差参数。

如果采用矩量法 (method of moments, MoM) 离散化式(1), 能够得到的矩阵方程为

$$W = XJ \quad (2)$$

式中: W 表示激励向量; X 表示阻抗矩阵; J 表示感应电流。

通常情况下, 阻抗矩阵的填充规模与目标尺寸的大小成正比^[8]。众多较为常用的稀疏变换矩阵同阻抗矩阵之间可通过托普利兹性更好地达到等距约束性(RIP), 也就是可将 X 自身看作是观测矩阵, 所求得观测值便是 W 。因此, 欠定方程的构建可通过在阻抗矩阵生成时只任意挑选局部行予以填充实现, 所构建的欠定方程为

$$W_q = X_q J \quad (3)$$

式(3)中, 通过对 X 行任意抽选可得到 X_q , 通过对 W 以同样的方式抽选可得到 W_q 。

与此同时, 通过运用阻抗矩阵远场组的非满秩特征, 将自适应交叉近似 (adaptive cross approximation, ACA) 引入 X_q 填充中, 可得

$$X_q = \sum_j X_{qm}(j) + \sum_i X_{qe}(i) \quad (4)$$

式(4)中, 通过初始阻抗矩阵 X 的对角块元素与非对角块元素分别组成 X_{qm} 、 X_{qe} , 且二者分别与近场组和远场组相对应, 动力学模型对应于远场组的 X_{qe} , 动力学

模型为

$$X_{qe}(i) = \frac{E_i H_i}{R(i) W(i)} \quad (5)$$

式中 $R(i)$ 、 $W(i)$ 分别表示动力学模型函数与函数约束条件。

为欠定方程内引入 ACA 后, 能够得到的表达式为

$$W_q = \left(\sum_j X_{qm}(j) + \sum_i R(i) \cdot W(i) \right) J \quad (6)$$

以 σ 表示所构建的稀疏变换矩阵, 并将 σ 代入式(6)中, 可得

$$W_q = \left(\sum_j X_{qm}(j) + \sum_i R(i) \cdot W(i) \right) \sigma \beta \quad (7)$$

式中 β 表示在 σ 内 J 的稀疏投影。

最优化问题的求解可通过恢复算法实现, 如正交匹配追踪 (orthogonal matching pursuit, OMP) 算法^[9-10], 其表达式为

$$W_q = \min \|\beta\|_{\text{KT-S}} \left[\left(\sum_j X_{qm}(j) + \sum_i R(i) \cdot W(i) \right) \sigma \right] \quad (8)$$

1.2 分段迭代的涡流误差快速补偿

在数字系统内, 离散量取值为 $a = b \cdot D_d$, 采样时间的间隔为 $b = 0, 1, 2, \dots, D_d$ 。过电流曲线表达式为

$$c(b, D_d) = W_q B_j \times f^{-\frac{D_d}{D_j} b} \quad (9)$$

式中: B_j 表示增益参数, $-1 < B_j < 1$; b 表示采样点数; D_j 表示时间参数。

1) 误差补偿控制分析

如果高压变频器系统内存数值与误差分别以 A 、 φ 表示, 那么迭代误差式为:

$$\Omega(b) = (A + \varphi)^b - A^b \quad (10)$$

$$\Omega(b+1) = \Omega(b) \cdot (A + \varphi) + \varphi \cdot A^b \quad (11)$$

现实涡流误差补偿中取 1~110 ms 量级的补偿时间常数 D_j 及 9 μs~1 ms 量级的采样间隔 D_d 。在 φ 和 A 确定, b 比较小时, 涡流需要补偿的误差与 b 成正比。故而迭代运算时对涡流误差的补偿控制非常有必要。

2) 确定分段大小

以确定的 4 组时间参数为依据, 能够得知 f 的指数项区间在 -0.000 1 ~ -0.1 量级之间。高压变频器系统的浮点数采用二进制表示, 但运算结果需以十进制值表示, 由于有效位数的制约导致运用高压变频器系统存储产生误差 φ , 各量级 f 指数的误差不同, 具体如表 1 所示。

表1 各量级 f 指数函数的存储误差情况

| f 指数 | 十进制值 | 二进制表示(21位有效数字) | 二进制向十进制值转化 A | 误差 φ |
|---------------|---------------|--|----------------|----------------------|
| $f^{-0.0001}$ | 0.988 700 100 | 1.111 111 111 110 01×10 ⁻¹ | 0.988 700 015 | 0.4×10 ⁻⁸ |
| $f^{-0.001}$ | 0.988 000 388 | 1.111 111 110 111 110 011 111×10 ⁻¹ | 0.988 000 438 | 4.8×10 ⁻⁸ |
| $f^{-0.01}$ | 0.980 038 722 | 1.111 110 101 110 011 111 001×10 ⁻¹ | 0.980 038 728 | 0.4×10 ⁻⁸ |
| $f^{-0.1}$ | 0.903 726 307 | 1.110 011 110 100 011 011 011×10 ⁻¹ | 0.903 726 318 | 1.0×10 ⁻⁸ |

通过迭代比较表 1 中数据,能够分析出迭代次数同多步迭代产生的累积误差间的关系,如表 2 所示。

表 2 迭代次数同迭代累积误差关系

| 项目 | 对比对象 | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | 同 $f^{0.01}$ 对比 | | 同 $f^{0.1}$ 对比 | |
| 迭代过程 | $(f^{-0.001})_{10}$ | $(f^{-0.0001})_{40}$ | $(f^{-0.01})_{10}$ | $(f^{-0.001})_{90}$ |
| 十进制值 | 0.980 040 210 | 0.980 040 02 | 0.903 726 355 | 0.903 730 760 |
| 误差 φ | 4.77×10^{-7} | 2.86×10^{-7} | 4.8×10^{-8} | 4.5×10^{-6} |

通过计算数值能够说明比较过程,并得出经过 10 次迭代运算之后所积累的误差增长 4.8 倍,另外由表 2 能够看出,误差随迭代次数的增长而升高。

在对高压变频器电流预加载之后,高压变频器暂态电磁涡流误差补偿后的高压变频器波形通过 D/A 数模转换器输出,其误差补偿准确度应维持在 15 位。由分析得知,通过 40 次迭代之后,误差补偿准确度可达到谱仪的设计需求,此时的准确度维持在 10^{-6} 量级。为此运算时取 $b=40$ 分段迭代间隔,也就是每进行 40 次迭代之后,再次采用 f 指数直接运算一次,将本段内原始值获取。基于此原始值运用迭代运算方式获取段内的剩余 39 个离散数据,也就是新的原始值为每次迭代 G 次之后,再次运用 f 指数运算一次所得。

2 实验验证

通过 Matlab-Simulink 在半实物仿真平台中创建高频变压器仿真模型进行仿真实验,分别采用所提方法、二维有限元方法及折算系数微分方程方法进行此高频变压器的暂态电磁涡流补偿,检验所提方法的性能。

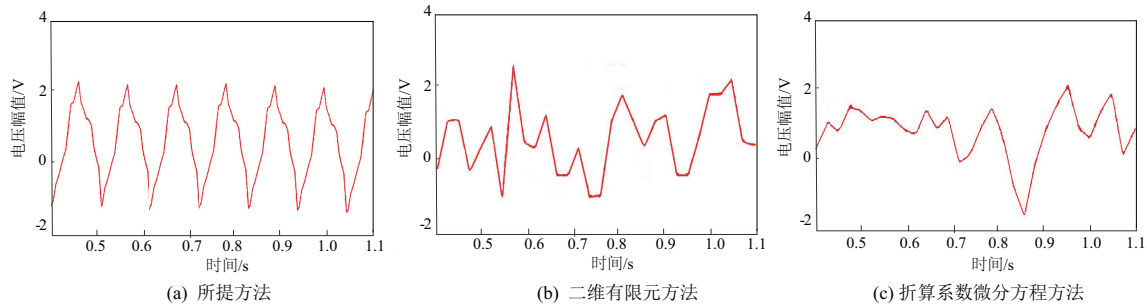


图 2 各方法涡流补偿后高压变频器输出电压波形

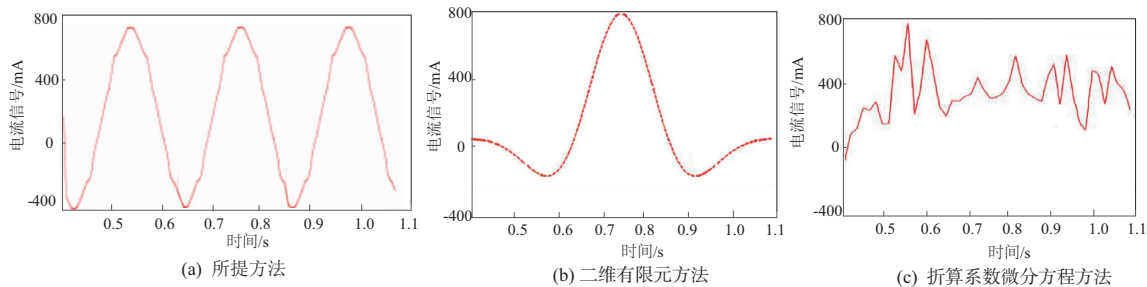


图 3 各方法涡流补偿后高压变频器输出电流波形

2.1 补偿效率对比

分别采用 3 种不同方法实行 10 次的涡流补偿运算,记录各方法运算所用时间,通过对比检验各方法的运算效率,对比情况见表 3。

表 3 各方法运算用时对比 单位:s

| 运算次数 | 所提方法 | 二维有限元方法 | 折算系数微分方程方法 |
|------|-------|---------|------------|
| 1 | 14.56 | 35.71 | 36.22 |
| 2 | 14.63 | 36.86 | 23.45 |
| 3 | 14.75 | 42.55 | 29.58 |
| 4 | 14.86 | 44.61 | 33.71 |
| 5 | 14.52 | 43.46 | 30.52 |
| 6 | 14.43 | 48.79 | 29.27 |
| 7 | 14.78 | 39.88 | 26.98 |
| 8 | 14.86 | 50.22 | 31.38 |
| 9 | 14.47 | 49.36 | 36.45 |
| 10 | 14.55 | 45.53 | 39.14 |

通过表 3 可得出,3 种方法的平均运算用时分别为 14.64 s、43.70 s、31.67 s,关系可表示为:所提方法<折算系数微分方程方法<二维有限元方法,且折算系数微分方程方法和二维有限元方法的 10 次运算平均用时是所提方法的 2.1~2.9 倍,说明所提方法的实际应用更省时,具有非常高的运算效率。

2.2 补偿效果对比

通过 3 种方法对实验高压变频器进行暂态电磁涡流补偿,检验各方法涡流补偿后实验高压变频器的输出电压与电流波形的稳定情况,检验结果见图 2 和图 3。

等多种方式报警,从而全面提升矿用带式输送机运行安全性。

4 结语

以大柳塔煤矿带式输送机为例,基于分布式光纤监测原理,构建井下胶带机温度监测系统,得出如下结论:

1)系统分别利用拉曼散射光原理和 DTS 技术实现温度监测和定位监测,温度监测精度可控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,定位精度可控制在 $\pm 0.3\text{ m}$ 以内;

2)系统可以实现对电机、滚筒和 CST 等重点位置的温度监测,发现电机温度>CST 温度>改向滚筒温度,根据温度监测结果可以区分运输机设备类型;

3)现场试验表明,系统不仅具备很高的定位精度和监测精度,而且还可以实现对带式输送机火灾预警功能;

4)系统可根据用户要求,分区设置预警和报警温度,还可以通过温升斜率、绝对温度以及相对温度等多种方式进行报警,可全面提升井下作业的安全性。

参考文献:

[1] 李军. KJ190 型带式输送机温度监测系统在煤矿的应用[J].

煤矿机电,2014(3):107-110.

[2] 李军. 大柳塔矿井下带式输送机防火监控系统实现与应用[J]. 煤矿机械,2013,34(12):177-179.

[3] 王腾飞. 矿用带式输送机智能化控制系统设计与应用[J]. 煤矿机械,2020,41(12):183-186.

[4] 刘栋. 一种基于 ZigBee 技术的矿用胶带输送机温度监测系统设计与应用[J]. 煤炭与化工,2020,43(6):75-76,79.

[5] 肖雅静,孟国营,杨睿. 带式输送机温度无线实时监测系统的研究与设计[J]. 中国煤炭,2015,41(9):80-82.

[6] 王玓睿,邓霄,张均,等. 面向冰盖剖面的高空间分辨率分布式光纤测温系统设计[J]. 应用光学,2021,42(5):941-948.

[7] 吴晓峰. 带式输送机沿线光纤测温装置及安装方式[J]. 机械工程与自动化,2021(4):206-207,210.

[8] 冯新,刘洪飞,王子豪. 管道泄漏分布式光纤监测时空大数据分析[J]. 油气储运,2019,38(9):988-995.

[9] 郭强,郝义,王双,等. 500 kV 充油海底电缆导体温度分布式光纤传感监测及应用[J]. 智慧电力,2021,49(1):77-82.

[10] 傅振云. 基于光纤测温的井下带式输送机火灾优化报警设计[J]. 能源技术与管理,2020,45(4):171-172,177.

收稿日期:2021-10-08

(上接第 227 页)

分析图 2 和图 3 可看出,所提方法对实验高压变频器进行涡流补偿后,高压变频器的输出电压与电流波形状况更为稳定,而其他两种方法均出现不同程度的偏差。其他方法对涡流误差补偿时,未对电磁散射进行迭代求解,得到优化结果,而是采用统一补偿的方式,但本文方法考虑到电磁涡流的电磁散射特性,采用分段迭代的方式对高压变频器进行了增强运算,实现了多分段的误差补偿。由此可见,所提方法的补偿效果更优越,具有更高的实际应用效果。

3 结语

为控制高压变频器输出电流电压的稳定性,避免对电机的影响,提出一种基于动力学模型的高压变频器暂态电磁涡流补偿方法,通过动力学模型分析高压变频器暂态电磁涡流的电磁散射特征,并以分段迭代方式实现高压变频器暂态电磁涡流补偿。仿真实验结果表明:所提方法具有较低运算误差与较高的补偿效率,性能稳定优越,实际应用性较强。

参考文献:

[1] 周少泽,李彬彬,王景坤,等. 改进型模块化多电平高压变频器及

其控制方法[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3772-3781.

[2] 张震宇,李兴鹤,金辛海. 基于级联式变频器的全阶磁链观测器转速估算[J]. 电力电子技术,2018,52(10):105-108,118.

[3] 王丽华,方旭东,韩素敏,等. 基于 BP 神经网络的三电平逆变器开路故障诊断研究[J]. 机床与液压,2020,48(9):187-191.

[4] 程国栋,王华平,夏晶晶. 高压绕线电动机转子变频调速技术研究[J]. 工矿自动化,2018,44(8):81-86.

[5] 刘韵,高长璧. 基于混合模块化多电平变换器的中压变频器设计[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(2):137-143,149.

[6] 罗小丽,陈意军,刘万太,等. 用于故障穿越的飞轮储能双三相异步电机驱动控制研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(8):88-94.

[7] 俞建军. 高速电机中频变频器的电路设计[J]. 微特电机,2019,47(5):59-63,67.

[8] 苏运,卜凡鹏,郭乃网,等. 基于低秩表示的多任务短期电力负荷预测的研究[J]. 现代电力,2019,36(3):58-65.

[9] 蒋卫良,杨生华,芮丰. 高压变频器在煤矿带式输送机上的应用[J]. 煤炭工程,2018,50(11):67-70.

[10] 朱二夯,黄浩,边旭,等. 大型同步调相机定子压圈涡流损耗计算及降损方法[J]. 电机与控制学报,2019,23(10):33-40.

收稿日期:2021-10-14