

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.08.008

500 kV 变电站内敞开式断路器感应电流计算分析

晏松¹, 张晓明¹, 马凯¹, 黄道均¹, 苏洋², 刘岗²

(1. 国网安徽省电力有限公司检修分公司, 安徽合肥 230041; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:为分析断路器与地线形成的回路中产生感应电流的特性,文章对处于变电站500 kV开关场内的断路器、导线、地网和2个接地线与接地刀闸组成的通流体回路中的感应电流进行测量,并分别对变电站500 kV开关场正常工作状态下和检修状态下的工频磁场进行仿真。研究表明:在检修状态下500 kV开关场内断路器通流体回路产生的感应电流峰峰值在3.85~7.33 A之间;正常工作状态下开关场磁感应强度范围在0.260~7.480 μ T之间,工频磁场强度最大值主要集中在导线交叉处;检修状态下开关场磁感应强度范围在0.440~8.760 μ T之间,工频磁场强度较大值主要集中在第2回母线下。研究结果为敞开式断路器检修人员安全作业提供参考。

关键词:500 kV 变电站;敞开式断路器;工频磁场;感应电流;仿真分析

中图分类号:TM721 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)08-1056-06

Calculation and analysis of induced current of open circuit breaker in 500 kV substation

YAN Song¹, ZHANG Xiaoming¹, MA Kai¹, HUANG Daojun¹, SU Yang², LIU Gang²

(1. Maintenance Branch, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230041, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The induced current will be generated in the circuit formed by the open circuit breaker and the ground wire. In this paper, the induced current of the circuit breaker, cable, ground grid and the fluid circuit composed of two ground wires and ground cutters in the 500 kV switching field of the substation is measured firstly. Then, the power frequency magnetic field of the 500 kV switching field of the substation is simulated respectively in the normal working state and during maintenance. The results show that the peak-to-peak value of the induced current generated by the fluid circuit of the circuit breaker in the 500 kV switching field is in the range of 3.85-7.33 A under maintenance condition. In normal working state, the magnetic induction intensity of the switching field ranges from 0.260 μ T to 7.480 μ T, and the maximum value of the power frequency magnetic field intensity is mainly distributed at the intersections of wires. The magnetic induction intensity of the switching field ranges from 0.440 μ T to 8.760 μ T under maintenance condition, and the higher value of power frequency magnetic field intensity is mainly distributed below the second bus. The research results can provide reference for the safety operation of overhaulers of open circuit breakers.

Key words: 500 kV substation; open circuit breaker; power frequency magnetic field; induced current; simulation analysis

收稿日期:2021-08-27;修回日期:2021-11-11

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技资助项目(521203200002)

作者简介:晏松(1979—),男,安徽合肥人,国网安徽省电力有限公司高级工程师。

0 引 言

近年来我国电力建设和电力产业迅猛发展,对电力系统中设备的承载能力提出了新的更高要求。随着电力系统中的用电负荷以及输变电系统容量的逐年增加,变电站的供电等级正在被不断提高^[1],电磁作业场景变动更加复杂。变电站是交流输变电运行系统中的枢纽,其内部带电设备众多,输送电母线与出线纵横交错,内部电磁场分布较为复杂^[2-4],电磁作业问题尤为突出^[5-6],引起了电力行业对变电站内电磁作业问题的重视。

在高压变电站 500 kV 开关场内,当 500 kV 高压断路器处于检修状态时,其两侧的隔离开关需置于断开状态,且需在断路器两侧悬挂接地线。在变电站开关场内分布的电磁场作用下,由断路器、导线、地网和 2 个接地线与接地刀闸等组成的通流体回路内将产生一个感应电流。特别对于高压敞开式断路器,由于其直接暴露在变电站复杂的电磁环境下,受环境影响尤为严重,其内部产生的感应电流更大。这对高压断路器检修作业人员的安全带来极大隐患^[7]。然而,国内外学者在断路器中感应电流的计算分析方面开展的研究较少,断路器中感应电流的分布特性并不清楚。因此,有必要开展在变电站开关场内电磁场环境的影响下,断路器通流体回路内产生的感应电流相关的计算与分析研究。

本文首先对变电站 500 kV 开关场断路器构成的通流体回路中感应电流进行测量;其次针对变电站 500 kV 开关场进行建模及模型简化,并仿真模拟正常工作状态下和检修状态下 500 kV 开关场内磁场的分布情况;最后通过计算得到断路器所处位置空间磁感应强度范围,并与测量出的感应电流进行对比分析。

1 感应电流测量

1.1 测量的回路

当 500 kV 敞开式高压断路器处于检修状态时,断路器两侧的刀闸处于断开状态,接地刀闸处于闭合状态。本文定义断路器、导线、地网和 2 个接地线与接地刀闸组成一个通流体回路,如图 1 所示。该通流体回路暴露在变电站开关场内的电磁场环境中,由法拉第电磁感应定律可知,在断路器闭合后,周围电磁场会在断路器通流体回路中产生感应电流;在断路器断开后会在断路器断口处产生感应电压。

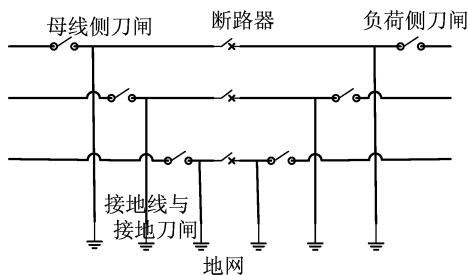


图 1 通流体回路

1.2 现场测量

使用带积分器的罗氏线圈测量断路器通流体回路中产生的感应电流。罗氏线圈是一种根据法拉第电磁感应定律和安培环路定律原理制造而成的空心环形线圈,线圈的输出电压与被测电流的变化率成正比,通过搭配放大电路和积分器,可以放大输出电压。根据罗氏线圈的变比,输出的电压波形经过变换可以得到接地线上流过的电流。

针对断路器通流体回路感应电流的测量,以安徽省濉溪 500 kV 变电站为例。濉溪变电站有 500 kV 敞开式高压断路器 6 组,分别为 501、502、503、504、505、506,出线采用 3/2 接线方式,即每一组包含有 A、B、C 三相,每一相采用 3 台断路器形成一串(编号 5061、5062、5063),如图 2 所示。在实际现场测量过程中,501~504 断路器组正常工作,5053、5063 断路器正常工作,500 kV 母线 II 正常工作,5051、5052 断路器停电建设,5061、5062 断路器停电检修,相邻 500 kV 母线 I 停电。

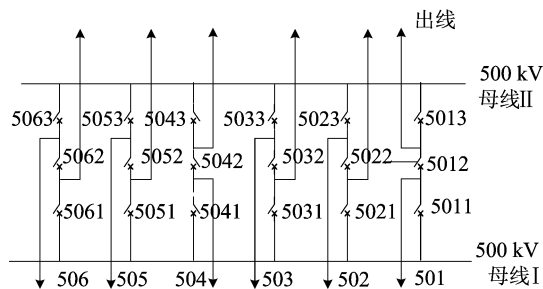


图 2 变电站 3/2 断路器接线示意图

现场测量图如图 3 所示。



图 3 现场测量图

与被测量的接地线并联的接地刀闸处于断开位置,保证感应电流全部是从接地线上流入接地网。不同相导线,由断路器、导线、地网和 2 个接地线与接地刀闸组成的通流体回路感应电流测量结果见表 1 所列,罗氏线圈积分器输出电压波形如图 4 所示。

表 1 不同相下通流体回路感应电流

断路器	电流峰峰值/A	断路器	电流峰峰值/A
5061 A 相	4.10	5062 A 相	4.53
5061 B 相	4.33	5062 B 相	7.33
5061 C 相	3.85	5063 C 相	5.93

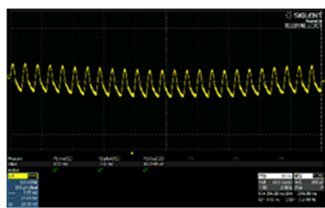


图 4 罗氏线圈积分器输出电压波形

从表 1 可以看出,通流体回路中产生的感应电流峰峰值在 3.85~7.33 A 范围之内,5061 断路器组通流体回路在变电站电磁场环境影响下产生的感应电流比 5062 断路器组通流体回路产生的感应电流小,5062 B 相断路器通流体回路产生的感应电流最大,电流峰峰值达到 7.33 A。从图 4 可以看出,示波器上显示的罗氏线圈的输出波形频率为 49.97 Hz,受到周围电磁场叠加影响,通流体回路产生的感应电流波形呈现出三角波形,通过对 5061 B 相断路器测量数据进行函数拟合,可以得到感应电流与时间的关系为:

$$f(t) = 2.9458\sin(314.3t + 0.8908) + 1.035\sin(628.6t + 0.5350) + 0.5253\sin(5.068t - 0.8034) \quad (1)$$

从式(1)可以看出,通流体回路中产生的感应电流受到变电站开关场内磁场叠加的影响,其输出频率主要受工频磁场的影响。

2 变电站 500 kV 开关场模型建立

变电站 500 kV 开关场内设备众多,大量集中分布了高压断路器、电流电压互感器、避雷器等电力设备以及这些电力设备对应的金属接支柱。建立模型时,需要对变电站内的设备进行简化处理。在建模过程中进行相应的简化,即将变电站 500 kV 开关场内负责输送电的导线视为由有限数目的直线段导体连接构成^[6]。

以濉溪变电站为例,500 kV 开关场有 2 回母

线和 12 回出线,进出线导线类型为 4×LGJ400-35 钢芯铝绞线,等效半径为 0.204 m。每回母线在 X 轴方向长度设置为 168 m,母线高度为 16.2 m,设置 A、B、C 三相之间相隔 6.5 m,其中 C 相在右侧,每一回都按照 C 相、B 相、A 相排列,第 1 回母线 A、B、C 三相在 Y 轴上的坐标点依次设置为 37.0、30.5、24.0;第 2 回母线 A、B、C 三相在 Y 轴上的坐标点依次设置为 133.0、126.5、120.0。每回出线在 Y 轴方向上长度设置为 143 m,出线相间 7.5 m,出线高度 23 m,6 回出线 C 相依次在 X 轴坐标点为 15.5、43.5、71.5、99.5、127.5、155.5,其对应的 B、A 相依次沿 X 轴正方向移动 7.5 m,其余设置不变。2 回进线高度为 25 m,A 相与 B 相间距 8 m,B 相与 C 相间距 14 m。导线下方设置金属支柱及绝缘套管,所建模型如图 5 所示。

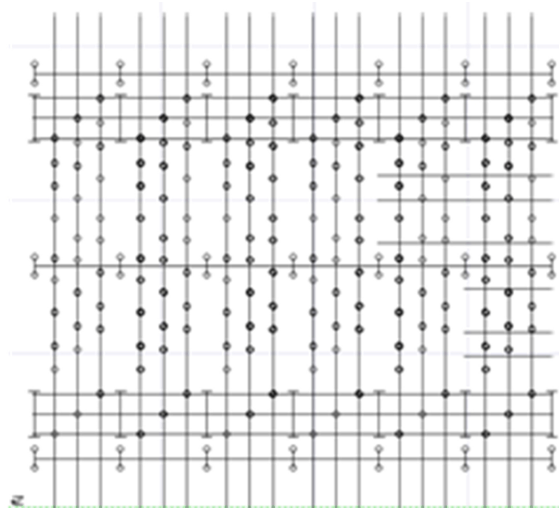


图 5 500 kV 开关场输电导线模型

3 仿真与结果分析

3.1 正常工作状态下 500 kV 开关场磁场

变电站正常运行时电流幅值随着负荷侧的变化而改变,因此在对变电站内的工频磁场进行仿真计算时,根据各个电气设备的具体情况,对每回进线、出线和母线上的各相电流幅值进行设定,每回导线的电流相位角依次滞后 120°,仿真计算得到开关场站内地面上方 1.5 m 处工频磁场的分布^[8-9],本文结果如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在正常工作条件下,变电站 500 kV 开关场内的磁场强度在 0.260~7.480 μT 之间。由于母线和出线产生的磁场叠加效果,在母线与出线的中间相下方磁感应强度较大,随着

离中间相导线距离增大,磁感应强度迅速下降。在 500 kV 开关场中间区域,由于受到磁场叠加影响,磁感应强度比最左侧和最右侧出线下方的磁感应强度低。500 kV 开关场内右侧受到进线、出线、母线的三重影响,母线与出线下方磁感应强度较大,磁场出现了偏移,靠近第 2 回母线的进线比第 1 回母线的进线要长,因此受到影响比较大。

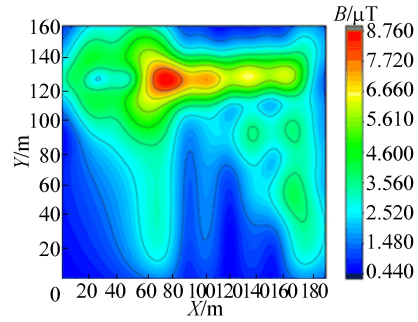
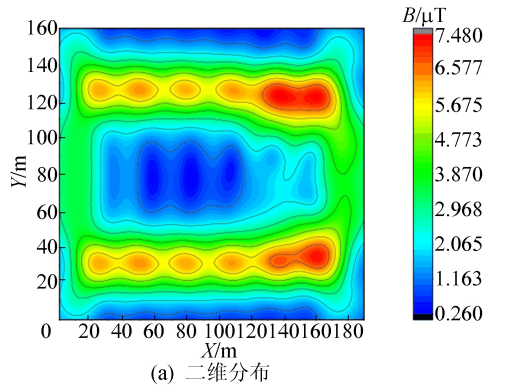
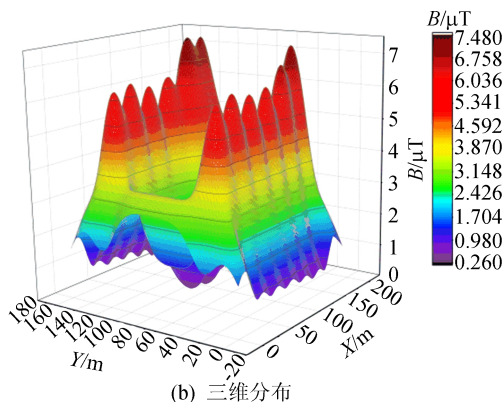


图 7 检修状态下磁场二维分布



(a) 二维分布



(b) 三维分布

图 6 500 kV 开关场区域工频磁场分布

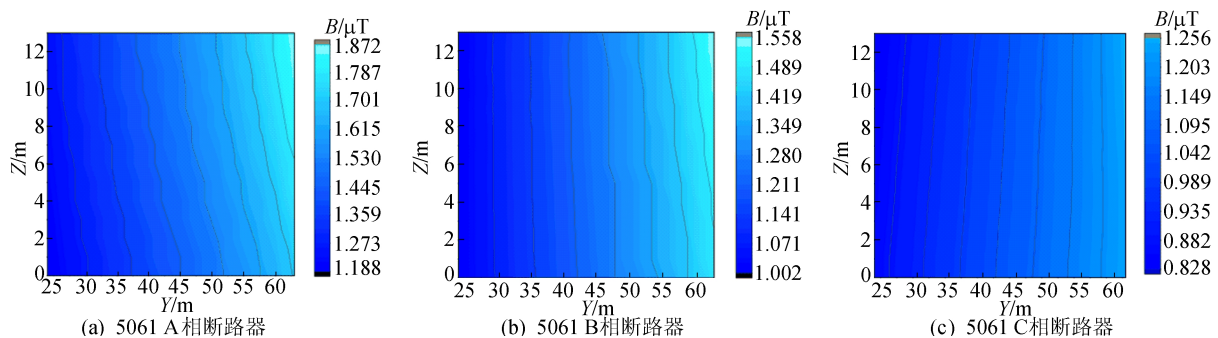
3.2 检修状态下 500 kV 开关场区域磁场分布

在现场实际测量感应电流时,500 kV 开关场在检修,5051、5052、5061、5062 断路器和 500 kV 母线 I 处于停电状态,因此在添加边界条件时,将不工作的导线上流过的电流设置为 0。其他边界条件不变,仿真计算得到开关场站内地面上方 1.5 m 处工频磁场的分布^[10-13],本文结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在 500 kV 开关场处于检修状态下,500 kV 开关场的磁感应强度范围在 0.440~8.760 μT 之间,500 kV 开关场的磁感应强度较大区域集中分布在第 2 回 500 kV 母线下方,距离 500 kV 母线 II 越远,磁感应强度越低,随着距中间导线距离的增大而迅速降低;靠近母线 I 附近区域的磁感应强度比正常工作情况下低。受到母线和出线产生的磁场叠加影响,在第 2 回母线下方的磁感应强度会出现波峰、波谷起伏的现象,并且在 504 出线 C 相外侧磁感应强度达到最大值 8.700 μT;由于 501~504 出线正常工作,且呈对称分布磁场相互抵消,磁场叠加后 502、503 出线下方的磁感应强度比 501、504 出线下方的磁感应强度降低。在位置分布上,5061 A、B、C 三相断路器离正常工作的 500 kV 母线 II 的距离比 5062 A、B、C 三相断路器远,因此可以看出 5061 断路器组所在位置的磁感应强度比 5062 断路器组低。

3.3 检修状态下 500 kV 开关场磁感应强度分布

由断路器、导线、地网和 2 个接地线与接地刀闸组成的通流体回路在变电站 500 kV 开关场内受到磁场变化是空间范围内的变化,因此需要对被测量的通流体回路所处空间的磁感应强度进行仿真计算。仿真计算的磁场在 Z 轴方向上为 0~12.5 m 高度,结果如图 8 所示,空间磁感应强度范围与电流峰峰值见表 2 所列。



(a) 5061 A 相断路器

(b) 5061 B 相断路器

(c) 5061 C 相断路器

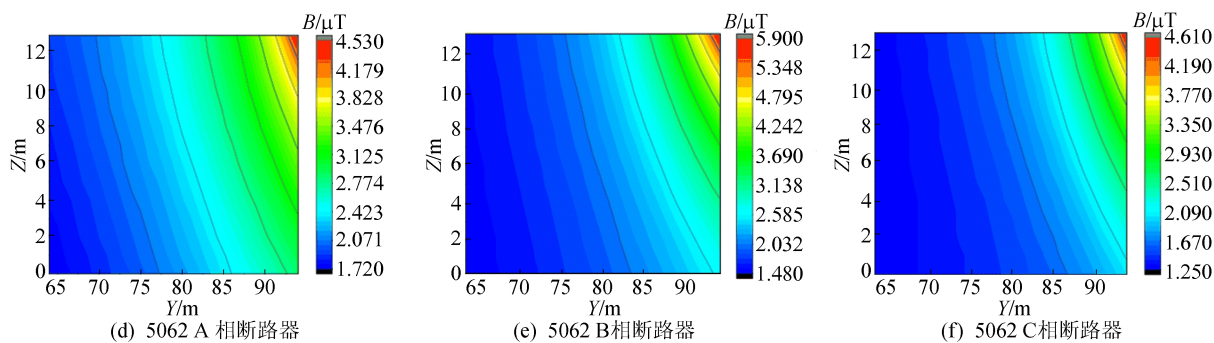


图 8 断路器下方空间磁感应强度

表 2 空间磁感应强度范围与电流峰峰值

断路器	磁感应强度范围/ μT	电流峰峰值/A
5061A 相	1.188~1.872	4.10
5061B 相	1.071~1.558	4.33
5061C 相	0.828~1.256	3.85
5062A 相	1.720~4.530	4.53
5062B 相	1.480~5.900	7.33
5063C 相	1.250~4.610	5.93

由图 8 可知,断路器下方的磁感应强度随着 Z 轴高度的上升呈现增长态势,在靠近断路器所在高度时,磁感应强度最大,越靠近正常工作的 500 kV 母线 II,磁感应强度范围越大。5061 A、B、C 三相断路器所在空间位置的磁感应强度范围明显低于 5062 A、B、C 三相断路器所在空间位置的磁感应强度。由表 2 可知,5062 断路器组所在空间位置磁感应强度变化范围大,5062 B 相断路器所在空间位置磁感应强度范围最大为 1.480~5.900 μT ,与之相对应的是在进行通流体回路感应电流实际测量时,5062 B 相测得的电流峰峰值最大。

根据法拉第电磁感应定律和麦克斯韦电磁场理论,闭合回路的感应电动势 ϵ 与穿越此回路的磁通 ϕ_m 之间的变化率 $\frac{d\phi_m}{dt}$ 成正比,其数学表达式为:

$$\epsilon = -\frac{d\phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S B dS \quad (2)$$

当只有磁感应的强度 B 随时间的变化而发生变化时,在回路中的其他部分对于媒质并无相对运动,此时式(2)变为:

$$\epsilon = -\int_S \frac{\partial B}{\partial t} dS \quad (3)$$

其中, S 为闭合回路所包围的面积,面积的正法线方向和导线的绕向符合右手螺旋关系。对于给定的导体回路,感应电流与感应电压成正比。将通流体回路中的阻抗认为一致时,感应电流的大小

可以反映通流体回路中的感应电压。

变电站 500 kV 开关场内,断路器通流体回路产生的感应电流大小与其所在位置的磁感应强度呈正相关。因此由表 2 可知,通过仿真得到的 500 kV 开关场工频磁场在 5062 B 相处所产生的磁感应强度范围最大,测量断路器通流体回路产生的感应电流也是 5062 B 相产生的感应电流最大。

4 结 论

1) 使用罗氏线圈测量断路器通流体回路中产生的感应电流,通过电流波形表明断路器通流体回路产生的感应电流是变电站 500 kV 开关场磁场叠加的影响,感应电流峰峰值在 3.85~7.33 A 范围内。

2) 分别对变电站 500 kV 开关场正常工作状态下和检修状态下工频磁场进行仿真计算,结果表明正常工作状态下 500 kV 开关场区域离地面高 1.5 m 平面上磁感应强度范围在 0.260~7.480 μT 内,2 回母线下磁感应强度较大;检修状态下工频磁感应强度分布在 0.440~8.760 μT 之间;断路器通流体回路所在区域越靠近 500 kV 母线 II 磁感应强度越大,离地面越高,磁感应强度越大。

3) 仿真得到的磁感应强度范围与测量通流体回路产生的感应电流对比分析表明,仿真得到的磁感应强度变化范围大小与不同位置下测得的感应电流大小呈正相关。

本文的研究结果可以为高压变电站内断路器检修作业人员安全作业和对高压断路器通流体回路中感应电流预估提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社,

- 2013;11-12.
- [2] 王青于,杨熙廖,晋陶,等. 特高压变电站人体工频电场暴露水平评估[J]. 中国电机工程学报,2014,34(24):4187-4194.
- [3] 刘海波,胡滨,王旭阳. 关于“十三五”配电网发展的思考[J]. 中国电力,2015,48(1):21-24.
- [4] 孙涛,万保权. 500 kV 变电站电磁环境参数测量[J]. 高电压技术,2006,32(6):51-55.
- [5] 李永明,何胜鱼,王旭旭,等. 变电站大型电力设备工频磁场计算及分析[J]. 南方电网技术,2019,13(11):83-88.
- [6] 李永明,罗鹏,徐禄文,等. 基于矩量法的变电站工频磁场建模与计算[J]. 中国电机工程学报,2015,35(16):4232-4238.
- [7] 王冉冉,徐静,李子扬,等. 特高压交流输电线路线下钢架建筑的感应电压、电流仿真分析[J]. 高电压技术,2021,47(2):724-731.
- [8] 杜志叶,阮江军,干喆渊,等. 变电站内工频电磁场三维数值仿真研究[J]. 电网技术,2012,36(4):229-235.
- [9] GERI A, LOCATELLI A. Magnetic fields generated by power lines [J]. IEEE Transactoin on Magnetics, 1995, 31(3):1508-1511.
- [10] KRAJEWSKI W. Numerical modelling of the electric field in HV substations[J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2004, 151(4):267-272.
- [11] 郭天伟,罗日成,潘茜雯,等. 750 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):46-53.
- [12] OLSEN R G, WONG P S K. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4):2046-2055.
- [13] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社,2010:239-253.

(责任编辑 张 镅)

(上接第 1055 页)

- [2] LIU K, FENG J H, GUO S Y, et al. Identification of flux linkage map of permanent magnet synchronous machines under uncertain circuit resistance and inverter nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2):556-568.
- [3] LIU Q, HAMEYER K. A fast online full parameter estimation of a PMSM with sinusoidal signal injection[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S. l.]:IEEE, 2015:4091-4096.
- [4] JUNG J, JUNG K, LEE B, et al. Design and analysis of ferrite magnet flux concentrated PMSM with cross-laminated rotor core using equivalent 2-D FEA[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3):1623-1631.
- [5] 邱腾飞,温旭辉,赵峰,等. 永磁同步电机永磁磁链自适应观测器设计方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2287-2294.
- [6] VESELY I, VESELY L, BRADAC Z. MRAS identification of permanent magnet synchronous motor parameters[J]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(6):250-255.
- [7] LIU Z, WEI H, ZHONG Q, et al. Parameter estimation for VSI-Fed PMSM based on a dynamic PSO with learning strategies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4):3154-3165.
- [8] 马一鸣,周理兵,王晋,等. 基于直流阶跃电压试验与 NSGA II 算法的同步电机动态参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23):4890-4900.
- [9] 刘细平,胡卫平,丁卫中,等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. 电工技术学报,2020,35(6):1198-1207.
- [10] 张立伟,张鹏,刘曰锋,等. 基于变步长 Adaline 神经网络的永磁同步电机参数辨识[J]. 电工技术学报,2018, 33(增刊 2):377-384.
- [11] DANG D Q, RAFAQ M S, CHOI H H, et al. Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3):1438-1449.
- [12] RAFAQ M S, MWASILU F, KIM J, et al. Online parameter identification for model-based sensorless control of interior permanent magnet synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6):4631-4643.
- [13] LIU K, ZHU Z Q. Quantum genetic algorithm-based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4):2363-2371.
- [14] ZHENG W, WANG X, PI Y. Study of the fractional order proportional integral controller for PMSM based on differential evolution algorithm[C]//2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). [S. l.]:IEEE, 2016:201-205.
- [15] WANG C, LIU Y C, LIANG X L, et al. Self-adaptive differential evolution algorithm with hybrid mutation operator for parameters identification of PMSM[J]. Soft Computing, 2018, 22(4):1263-1285.
- [16] 林巨广,陈桐. 基于改进 RLS 算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(7):876-880,934.

(责任编辑 张 镅)