

多路并联真空断路器磁屏蔽结构设计与优化

李颖卓^{1,2}, 陈立学^{1,2}, 何莹辉^{1,2}, 江林岳^{1,2}, 徐晟钦^{1,2}

(1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074;

2. 脉冲功率技术教育部重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 武汉 430074)

摘要: 多路并联是发电厂侧真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)的发展趋势, 并联导致的邻近效应和磁偏弧现象影响着 VCB 开断性能。首先, 进行 6 路并联 VCB 有限元仿真, 研究开断过程中邻路横向磁场(transverse magnetic field, TMF)作用下触头片的邻近效应和真空电弧截面的 TMF 分布。为了屏蔽邻路 TMF, 设计了一种非等厚铝屏蔽罩, 并研究了铝屏蔽罩的磁场分布特性和涡流损耗特性, 接着构建了以屏蔽罩开口处厚度、中部厚度、半径和长度为输入, 电弧截面 TMF 分布的径向不对称度和屏蔽罩涡流损耗分别为输出的径向基函数神经网络(radial basis function neural network, RBFNN)模型, 并结合非支配排序遗传算法 II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA2)对屏蔽罩结构进行优化。结果表明: 当屏蔽罩开口处厚度为 14.50 mm、中部厚度为 5.53 mm、半径为 110.12 mm、长度为 258.81 mm 时, 屏蔽罩具有较高的屏蔽能力和较小的涡流损耗。最后检验了铝屏蔽罩在 VCB 开断过程中的瞬态屏蔽能力, 结果表明铝屏蔽罩对于三相短路故障开断时的邻路横磁具有较好的屏蔽效果。

关键词: 真空断路器; 横向磁场; 屏蔽罩; 涡流损耗; RBF 神经网络; NSGA2 优化算法

Design and Optimization of Magnetic Shielding Structure for Multi-channel Parallel Vacuum Circuit breaker

LI Yingzhuo^{1,2}, CHEN Lixue^{1,2}, HE Yinghui^{1,2}, JIANG Linyue^{1,2}, XU Shengqin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology Ministry of Education, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Multi-channel parallel connection is a trend of vacuum circuit breaker(VCB) at generator outlet, and the proximity effect and magnetic arc blow caused by parallel connection affect the VCB's breaking capability. First, finite element simulation of 6-way parallel VCB is conducted, and the proximity effect of contact plate caused by transverse magnetic field(TMf) from neighboring road and the TMf distribution in cross-section of the arc during breaking are analyzed. To shield the neighboring TMf, a non-uniform thickness aluminum shielding cover is designed, and the distribution of magnetic field and eddy current loss of aluminum shielding cover are also investigated. Second, the radial basis function neural network (RBFNN) model is constructed in which the thickness at the opening of the shielding cover, the thickness in the middle, the radius and the length of the shield are taken as inputs, and the radial asymmetry of the TMf distribution of the arc cross-section and the eddy current loss of the shielding cover are taken as outputs; moreover, the shielding cover structure is optimized by non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA2). It is shown that the shielding cover has better shielding capability and smaller eddy current loss when the thickness at the opening is 14.50 mm, the thickness at the center is 5.53 mm, the radius is 110.12 mm, and the length is 258.81 mm. Finally, the transient shielding capability of aluminum shielding cover during the VCB breaking is tested, and it is shown that aluminum shield has good shielding capability for TMf of three-phase short-circuit fault breaking.

Key words: vacuum circuit breaker; transverse magnetic field; shielding cover; eddy current loss; RBF neural network; NSGA2 optimization algorithm

0 引言

随着现代社会对电能需求不断提高,发电厂的装机容量也不断攀升。百万千瓦发电机组额定电压约 30 kV, 额定电流 20 kA 以上, 短路电流 200 kA 以上, 具有中压大电流的特点, 电流等级远超单个真空灭弧室载流能力, 因此需要将多个真空灭弧室并联, 共同承担额定电流和短路电流^[1]。

当多路真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)并联运行时, 在邻路横向磁场(transverse magnetic field, TMF)作用下, 每一路均会出现临近效应, 电流在远离邻路的一侧聚集, 不仅增加损耗, 还会导致开断过程起始阶段的电流密度较大, 容易形成积聚性电弧, 降低真空开关的开断性能^[2-4]。

在开断过程中, 邻路产生的横向磁场作用于电弧, 使电弧向一侧偏移, 导致电弧原有的对称性被破坏, 出现磁偏弧现象^[5-8]。在真空断路器磁偏弧研究方面, D Y Fang 等研究了阴极斑点电弧的倒退运动与 TMF、电流、等离子体压力等因素的关系^[9]。贾申利等研究了外部 TMF 对真空电弧的影响, 发现外部 TMF 会将电弧吹向弧隙外侧, 削弱真空灭弧室的开断性能, 并提出一种筒状铁磁屏蔽罩实现了对外部 TMF 的屏蔽^[10]。黄小龙等进行了外部 TMF 作用下真空电弧偏移与阳极偏烧现象的仿真, 仿真结果表明: 电弧在外部 TMF 作用下会产生明显偏移, 聚集的电弧导致电流过零时极间仍残留较多的等离子体, 对 VCB 开断性能造成不利影响^[11]。葛国伟等研究了不同排列方式下双断口真空断路器的 TMF 分布特性, 并在铜屏蔽罩外围涂上导磁材料涂层有效地屏蔽了横向磁场^[5]。

综上, 外界 TMF 导致的邻近效应和磁偏弧现象会对断路器开断性能和触头烧蚀情况造成不利影响, 需要设计屏蔽结构实现对外部 TMF 的屏蔽。

为了提高多路并联真空断路器的快速开断性能, 往往会在短路电流第一个过零点前叠加一个中高频分量, 人为制造多个短路电流过零点^[12-14]。在中高频(1 kHz)开断的过程中, 高电导率金属(例如铝)由于电磁感应原理会产生较强的涡流效应^[15-17], 实现对外界横磁的屏蔽, 而铁磁材料由于趋肤效应、磁滞和磁饱和现象屏蔽能力将大幅降低。

本文搭建有限元仿真模型, 分析了 6 路并联 VCB 触头片和电弧区域的电磁特性, 设计一种非等厚铝屏蔽罩屏蔽邻路 TMF, 并利用径向基函数

(radial basis function, RBF)神经网络^[18-19]结合非支配排序遗传算法 II(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA2)^[20-22]对其结构进行优化, 使其具有较高的屏蔽能力和较小的涡流损耗。

1 6 路并联 VCB 电磁场仿真模型

1.1 几何模型与材料参数

在有限元仿真软件中建立真空断路器 6 路并联 3D 模型, 见图 1, 中间为 6 个灭弧室, 两侧为管状母线, 灭弧室内的触头结构主要包括导电杆、纵磁触头、真空电弧和触头片等, B_{TMF} 为邻路横磁。模型各组成部分的材料及参数见表 1。多路并联 VCB 系统不含磁性材料, 因此各部分材料的相对磁导率均近似为真空相对磁导率。影响模型电磁特性的关键尺寸见表 2。

1.2 开断电流波形

为实现快速开断, 6 路并联 VCB 采用并联 LC 振荡电路结构, 见图 2。其中, U_N 、 L_N 和 C_N 分别为电压源、电源侧电感和电容。

在开断过程中, LC 振荡电路为短路电流叠加中高频分量。该中高频分量幅值较大, 在开断电流各分量中占据主导地位。为减小仿真运算成本, 便

表 1 VCB 有限元仿真模型材料参数

Table 1 Material parameters of VCB finite element simulation model

VCB 组成部分	材料	电导率/($S \cdot m^{-1}$)	相对磁导率
导电杆	铜	5.8×10^7	1
端盖	铜	5.8×10^7	1
瓷瓶	陶瓷	1×10^{-5}	1
屏蔽罩	不锈钢	1.4×10^6	1
触头	铜	5.8×10^7	1
触头片	CuCr50	2.1×10^7	1
外部	空气	1×10^{-5}	1
电弧	等离子体	1×10^3	1
管状母线	铜	5.8×10^7	1

表 2 VCB 模型关键尺寸

Table 2 Key dimensions of VCB model

结构参数	数值/cm
灭弧室长度	40
相邻灭弧室间距	34
电弧模型半径	3.5
触头半径	4
不锈钢屏蔽罩长度	11
不锈钢屏蔽罩半径	6
含管状母线模型总长度	325

于后续优化算法迭代, 可以暂时忽略开断时刻的原短路电流暂态分量, 将实际开断电流近似为幅值 180 kA(单路 30 kA), 频率 1 kHz 的 LC 振荡电流, 采用频域求解器对模型进行求解。

1.3 磁场计算数学模型

控制方程由麦克斯韦方程组联立得到:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 为磁矢势; \mathbf{J} 为电流密度; φ 为标量电势; ρ 为电荷体密度; μ 为磁导率; ϵ 为介电常数; t 为时间。在 6 路并联 VCB 模型外加入空气域, 空气域的边界条件为磁绝缘和电绝缘。

2 6 路并联 VCB 电磁特性分析

2.1 邻近效应与电弧截面横向磁场分布

本文研究的对象, 磁场主要由传导电流产生, 位移电流可以忽略, 是典型的磁准静态场, 因此可以忽略波动方程中时间的二阶导数项, 得到扩散方程(3), 复数柱坐标形式的亥姆霍兹方程如式(4)。

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \dot{\mathbf{H}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \dot{\mathbf{H}}}{\partial \phi^2} - j\omega\mu\gamma \dot{\mathbf{H}} = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{H} 为磁场强度矢量; $\dot{\mathbf{H}}$ 为复数形式, 后文各变量同此; γ 为电导率; ω 为角频率; r 为极坐标长度变量; ϕ 为角度变量。

无外部横向磁场时的边界条件和电流分布:

$$\dot{\mathbf{H}}(\theta, R_0) = \dot{\mathbf{H}}_0 \quad (5)$$

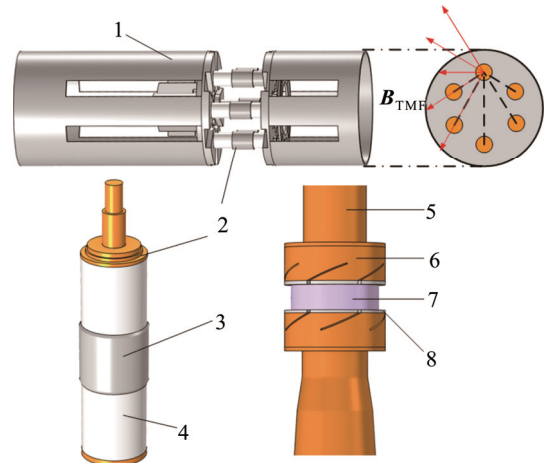
$$\dot{\mathbf{J}} = \nabla \times \dot{\mathbf{H}} \quad (6)$$

式中: H_0 为圆柱电弧边界磁场常数值; θ 为角度变量; R_0 为电弧半径。圆柱形导体横截面内的电场、磁场关于圆心呈中心对称分布, 存在趋肤效应但不存在邻近效应。

当外部 TMF 垂直作用于圆柱形导体时, 边界条件为:

$$\dot{\mathbf{H}}(\theta, r) = \dot{\mathbf{H}}_0 + \dot{\mathbf{H}}_{\text{TMF}}(\theta, r) \quad (7)$$

此时, 圆柱形导体的边界条件不再为常数, 电流分布对称性被破坏, 出现邻近效应。VCB 触头片的电流分布和电弧截面的磁场分布见图 3、图 4。由图可知, 由于邻路 TMF 的作用, 远离邻路一侧电流密度较大, 出现邻近效应; 同时, 邻路产生的 TMF



1—管状母线; 2—灭弧室; 3—不锈钢屏蔽罩; 4—瓷瓶; 5—导杆; 6—触头; 7—真空电弧; 8—触头片

图 1 6 路并联真空断路器有限元仿真模型

Fig.1 Finite element simulation model of vacuum circuit breaker with six vacuum interrupters (VIs) in parallel

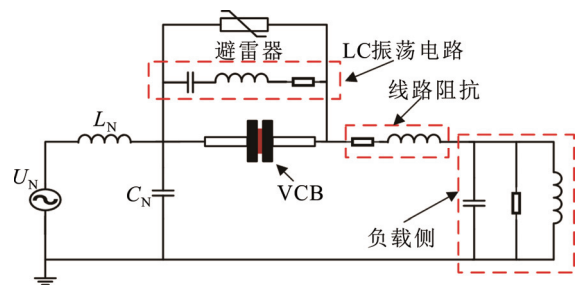


图 2 LC 并联式 VCB 集中参数电路

Fig.2 VCB's lumped-parameter circuit with LC parallel

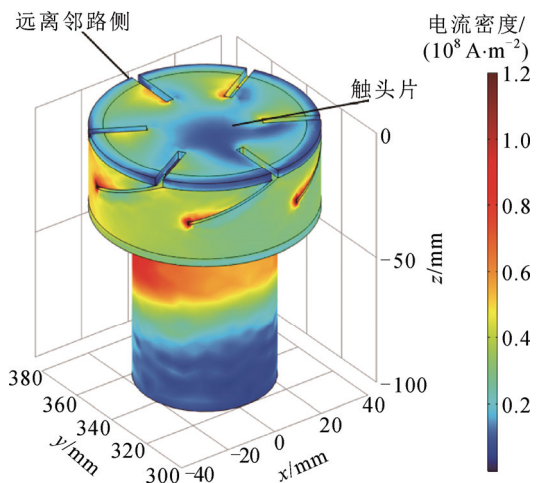


图 3 触头片电流密度分布

Fig.3 Distribution of current density in the contact plate

与本路环状 TMF 叠加, 导致电弧截面磁场分布不对称, 远离邻路侧的 TMF 较大, 进而会导致磁偏弧现象的产生。邻路 TMF 导致的邻近效应和磁偏弧现象均会对 VCB 开断性能造成不利影响。

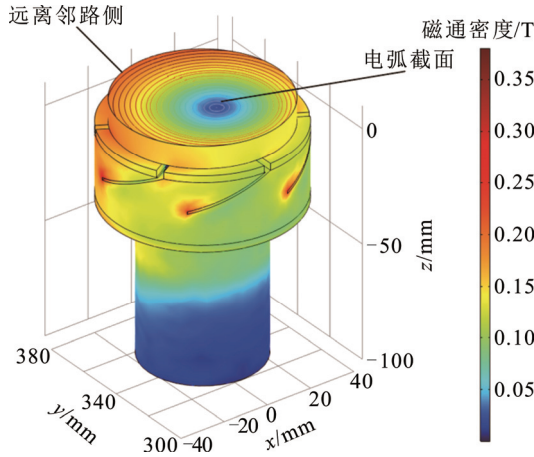


图4 电弧截面 TMF 分布

Fig.4 TMF distribution in cross-section of the arc

2.2 灭弧室间距对 TMF 分布的影响

根据安培环路定理, 邻路干扰横磁随着灭弧室间距的增大而减小, 在前文模型的基础上探究不同灭弧室间距 D 下的邻路横磁 B_{TMF1} 和电弧截面总横磁 B_{TMF2} 在电弧截面直径方向 l 上的分布, 如图 5 和图 6。

邻路横磁 B_{TMF1} 满足关系式:

$$B_{TMF1} = B_{TMF2} - B_{TMF0} \quad (8)$$

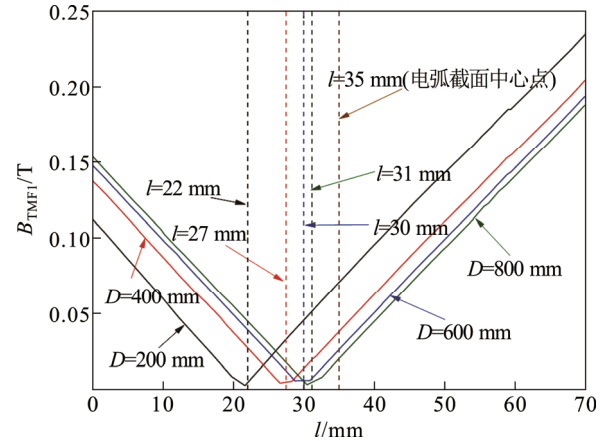
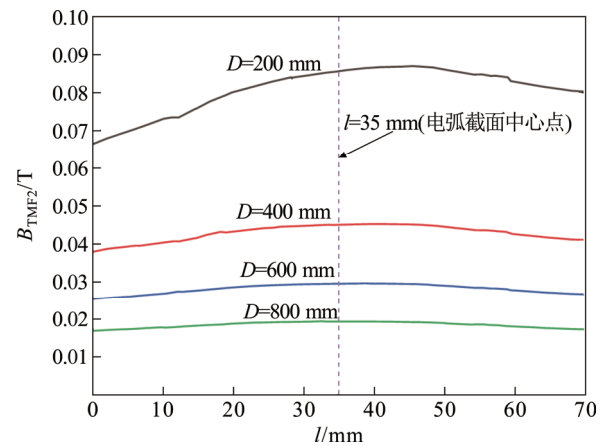
式中: B_{TMF0} 为本路电流和电弧产生的横向磁场。

由图 5 可知, 随着灭弧室间距 D 的增大, 电弧截面的横磁 B_{TMF1} 分布关于中心点的对称度提高, 最小横磁所在位置逐渐向电弧截面中心点 $l=35$ mm 偏移, 但是偏移速度随着 D 的增大而逐渐减慢, 当 $D=800$ mm 时, 最小横磁所在位置为 $l=31$ mm, 距离 $l=35$ mm 相差 4 cm。

由图 6 可知, 邻路横磁 B_{TMF2} 在电弧截面直径方向大致关于中心点 $l=35$ mm 呈对称分布, 呈现中间大两头小的趋势, 随着灭弧室间距 D 的增大, 邻路横磁 B_{TMF2} 逐渐减小, 但减小速度减慢, 当灭弧室间距达到 800 mm 时, 电弧截面内仍有较明显的邻路横磁, 幅值接近 20 mT。考虑到并联驱动式斥力机构的开断性能和 VCB 系统的空间成本, 6 路并联 VCB 的灭弧室间距不应过大, 同时绝缘保护和传感器布置也需要空间, 本文取实际工程的适中值 $D=340$ mm, 此时电弧截面仍然会有较大的横磁。综上, 由于灭弧室间距的限制, 无法通过增大灭弧室间距来削弱横磁, 因此需要设计磁屏蔽结构。

2.3 铝屏蔽罩屏蔽与损耗特性

铝具有较大的电导率, 根据趋肤深度计算式

图5 不同间距 D 下电弧截面总横磁 B_{TMF1} 分布Fig.5 B_{TMF1} distribution in cross-section of the arc for different D 图6 不同间距 D 下电弧截面邻路横磁 B_{TMF2} 分布Fig.6 B_{TMF2} distribution in cross-section of the arc for different D

(9), 当铝处于交变电磁场时, 其趋肤深度 δ 较小, 外界磁场无法穿过铝结构, 只能分布在铝结构表面, 因此可以利用该原理制作屏蔽罩。为了使铝屏蔽罩在频率 f 为 1 kHz 开断电流激励下达到理想的屏蔽效果, 屏蔽罩厚度应大于 δ 。由式(9)知, $\delta=2.58$ mm, 为留有裕度屏蔽罩厚度暂时取 5 mm。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \gamma \mu}} \quad (9)$$

虽然邻路 TMF 由于感应涡流无法直接穿过铝屏蔽罩作用于电弧和触头, 但少量的 TMF 可以流经铝屏蔽罩开口处, 绕过铝屏蔽罩作用于电弧和触头, 因此需要对 VCB 磁场分布特性进行研究。

在前文建立的有限元仿真模型基础上加入铝屏蔽罩, 见图 7。铝电导率取 3.8×10^7 S/m, 使用幅值 180 kA (单路 30 kA), 频率 1 kHz 的电流源激励,

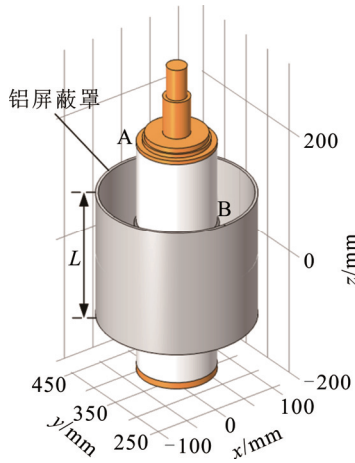


图7 含铝屏蔽罩的VCB模型

Fig.7 VCB model with aluminum shielding cover

得到屏蔽罩内侧的磁场分布曲线图, 见图8。其中: L 为屏蔽罩长度, $y=405、415、425$ mm对应的曲线为远离邻路侧(A侧)磁场分布; $y=275、265、255$ mm对应的曲线为靠近邻路侧(B侧)磁场分布。

由图8可知:

1) 经过邻路TMF叠加后, A侧的磁通密度增大, B侧的磁通密度减小。

2) 距离屏蔽罩中部越近(z 越接近0), A侧和B侧的磁通密度差值越小, 屏蔽效果越好。

3) 距离屏蔽罩内壁越近(A侧的 y 越大, B侧的 y 越小), A侧和B侧的磁通密度差值越小, 屏蔽效果越好。

由结论2)、3)进一步推断: 铝屏蔽罩长度和半径会对电弧区域的邻路TMF屏蔽效果造成影响。

大容量真空断路器额定电流较大, 当铝屏蔽罩应用于该系统时, 其额定工况下的涡流损耗也较大, 由于额定工况占据VCB绝大部分运行时间, 因此额定工况下的涡流损耗会产生较多的热量, 影响VCB系统的性能; 而在短路工况下, 虽然短路电流幅值和频率均较大, 造成的涡流损耗功率较大, 但由于开断过程所需时间极短, 短路工况下屏蔽罩涡流损耗产生的热量不足以使屏蔽罩出现明显温升。

综上, 本文仅研究额定工况下屏蔽罩的涡流损耗特性。依据前文建立的有限元仿真模型, 使用有效值30 kA(单路5 kA), 频率50 Hz的额定电流激励, 依据式(10)研究额定工况下铝屏蔽罩的涡流损耗 P 分布特性, 见图9, 其中 V 代表整个屏蔽罩区域, γ_{Al} 为铝电导率, J 代表电流密度。

$$P = \iiint_V \frac{J(x, y, z)^2}{\gamma_{Al}} dx dy dz \quad (10)$$

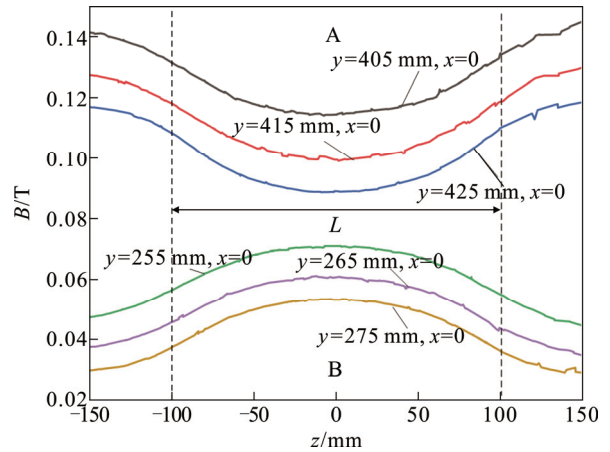


图8 铝屏蔽罩内的TMF分布

Fig.8 TMF distribution inside the aluminum shielding cover

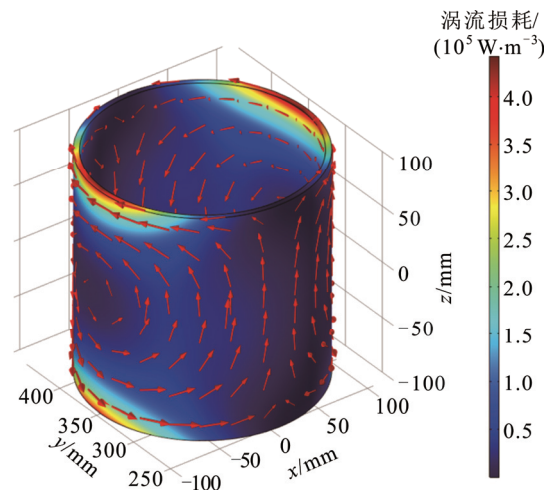


图9 铝屏蔽罩涡流损耗分布

Fig.9 Distribution of eddy current loss in aluminum shielding cover

由图9可知, 大部分涡流分布在与邻路TMF垂直的平面, 涡流损耗集中分布在屏蔽罩两端的开口处, 而中部较少。为了提高涡流分布的均匀性以减小损耗, 可以增大屏蔽罩两端开口处的厚度, 设计一种开口处厚度大于中部厚度的非等厚屏蔽罩。

3 屏蔽结构设计与优化

3.1 计及电绝缘的屏蔽罩尺寸选定与约束

由前文铝屏蔽罩屏蔽特性和损耗特性可知: 屏蔽罩长度及半径会对其屏蔽性能造成影响, 屏蔽罩开口处厚度可能会对其涡流损耗造成影响。事实上, 屏蔽罩各尺寸对于屏蔽性能和涡流损耗的影响具有此消彼长的特性, 为提高屏蔽罩屏蔽能力的同时减小涡流损耗, 选取屏蔽罩主要尺寸: 开口处厚度、

中部厚度、半径、长度作为待优化尺寸, 分别记为 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 , 见图 10。

在使用优化算法进行尺寸寻优前, 需要给出屏蔽罩各尺寸调节范围。6 路并联式真空断路器额定工作电压为 31.5 kV, 中国电力系统绝缘配合要求 35 kV 电压等级的系统最大操作过电压不应超过 4p.u.(基准值为 35 kV)^[23], 记为 U_m 。屏蔽罩采用接地绝缘支架固定, 未击穿时电位为 0。常温常压下的空气击穿场强 E_0 约为 30 kV/cm^[24-25]。因此屏蔽罩距离绝缘瓷瓶以及管状母线的最近距离 d_{\min} 应满足式(11), 大小为 4.2cm, 为留有裕度, 取 $d_{\min}=5$ cm。根据式(11), 以及 VCB 系统与屏蔽罩绝缘相关的尺寸, 见表 3, 可知铝屏蔽罩的尺寸应满足不等式(12)的约束。

$$d_{\min} = \frac{U_m}{E_0} \quad (11)$$

$$\begin{cases} d_1 + d_3 < 17 \text{ cm} \\ d_2 + d_3 < 17 \text{ cm} \\ d_3 > 6 \text{ cm} + d_{\min} \\ d_4 < 40 \text{ cm} - 2d_{\min} \\ d_1 > 0, d_2 > 0, d_3 > 0, d_4 > 0 \end{cases} \quad (12)$$

3.2 RBF-NSGA2 模型

在电弧截面沿直径方向设置 M 个横磁等距观测点 \dot{B}_i , 见图 11, 其中 \dot{B}_i 包含了幅值和相位信息, 且不包含磁场 z 方向的分量。定义电弧截面 TMF 分布的径向不对称度 σ , 见式(13)。当无外界 TMF 作用时, 电弧截面 TMF 分布关于圆心中心对称, σ 为 0; 当有外界 TMF 作用时, 电弧截面原有 TMF 与外界 TMF 叠加, 导致 TMF 分布失去对称性。若未采取屏蔽措施, σ 随着外界 TMF 的增大而增大。综上, 可将 σ 作为反映屏蔽罩屏蔽效果的指标。

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M/2} (B_i - B_{M-i+1})^2}}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M B_i} \quad (13)$$

在时谐场中, 磁感应强度不仅包含幅值信息, 还包含相位信息。以第 M 个观测点的磁场相位为基准相位, 令式(13)中的 B_i 满足:

$$B_i = |\dot{B}_i| \cos(\varphi_i - \varphi_M) \quad (14)$$

利用有限元仿真软件对屏蔽罩的参数 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 进行扫描, 生成样本, 得到不同参数下中高频开断过程中电弧截面磁场径向不对称度 σ 和屏蔽罩额定工况损耗 P , 见表 4。

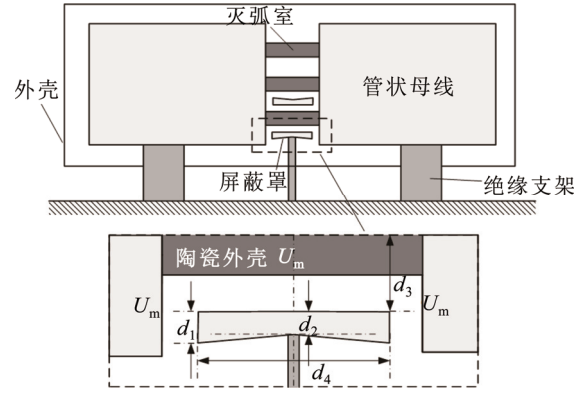


图 10 屏蔽罩的位置与尺寸

Fig.10 Location and dimensions of the shielding cover

表 3 VCB 系统与绝缘相关的尺寸

Table 3 Insulation-related parameters in VCB systems

参数	数值
管状母线间距/cm	40
灭弧室间距/cm	17
灭弧室最大外径/cm	6

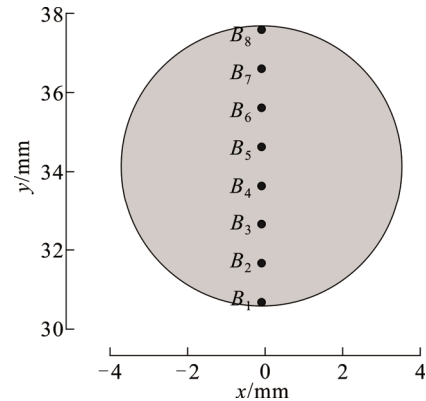


图 11 电弧截面磁场观测点

Fig.11 Magnetic field observation points in cross-section of the arc

建立径向基函数神经网络模型(radial basis function neural network, RBFNN)。RBFNN 是一种以 RBF 作为激活函数的神经网络, 具有局部响应和快速收敛的特点。选取损耗 P 和磁场径向不对称度 σ 作为目标量, 选取 d_1 、 d_2 、 d_3 和 d_4 作为模型的输入量, 随机抽取 215 个样本作为训练集, 剩余 10 个样本作为测试集。数据归一化处理后, 选取高斯函数作为激活函数 R_i , 见式(15), 其中 \mathbf{X} 为输入向量, \mathbf{C}_i 为第 i 个基函数中心值, σ_i 为第 i 个基函数中心点宽度。

$$R_i(\mathbf{X}) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{X} - \mathbf{C}_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right), i=1, 2, \dots, M \quad (15)$$

表 4 屏蔽罩不同参数下涡流损耗和磁场径向不对称度

Table 4 Eddy current loss and radial asymmetry of magnetic field for different parameters of shielding cover

样本编号	d_1/cm	d_2/cm	d_3/cm	d_4/cm	σ	P/W
1	5	5	110	150	0.517 7	25.38
2	5	5	110	200	0.364 9	39.45
3	5	5	110	300	0.161 0	59.69
4	5	5	120	150	0.541 8	27.83
5	5	5	120	200	0.404 3	42.81
6	5	5	120	300	0.195 3	64.80
7	5	5	130	150	0.565 4	29.94
8	5	5	130	200	0.444 5	45.99
9	5	5	130	300	0.229 9	69.51
10	5	10	110	150	0.528 7	25.02
11	5	10	110	200	0.368 4	36.37
12	5	10	110	300	0.165 1	52.76
13	5	10	120	150	0.544 9	27.27
14	5	10	120	200	0.409 9	39.51
15	5	10	120	300	0.198 2	57.38
16	5	10	130	150	0.564 5	29.12
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
223	30	30	120	150	0.546 9	43.08
224	30	30	120	200	0.424 9	56.25
225	30	30	120	300	0.220 0	80.02

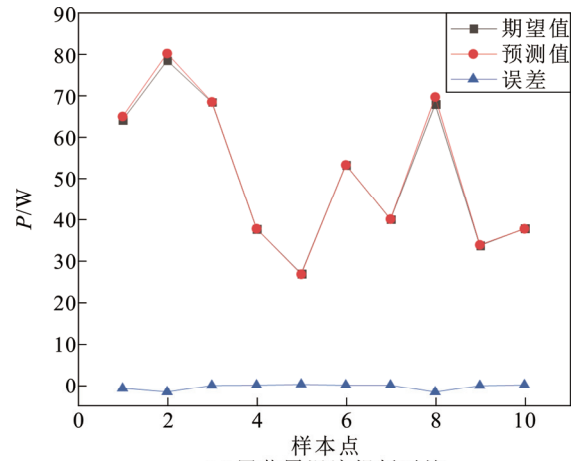
利用网格搜索方法进行神经网络参数寻优: 对于目标量 P , 当扩展速度 $spread$ 值为 100 时, 测试集的均方根误差(root mean squared error, RMSE)最小, 为 0.002 3; 对于目标量 σ , 当 $spread$ 值为 20 时, 测试集的 RMSE 最小, 为 0.001 6。

神经网络拟合结果见图 12, 拟合误差接近于 0, 曲线重合度较高, 拟合效果较好。

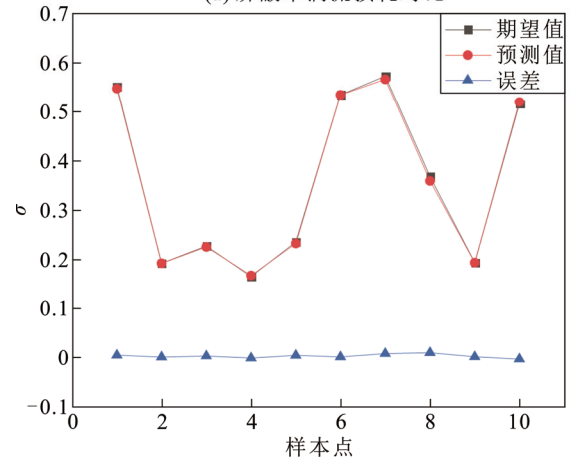
NSGA2 算法是一种快速非支配排序多目标优化的遗传算法。将拟合好的 RBF 神经网络嵌入 NSGA2 优化算法, 以损耗 P 和径向不对称度 σ 作为优化目标进行屏蔽罩尺寸寻优, 算法流程见图 13, 最终得到 Pareto 解集, 见图 14。在 Pareto 解集中, 若归一化后的损耗 P 和径向不对称度 σ 权重取 1:2, 则该最优解为 $P=40.55 W$, $\sigma=0.232 6$, 对应的尺寸为: $d_1=14.50 mm$, $d_2=5.53 mm$, $d_3=110.12 mm$, $d_4=258.81 mm$ 。

3.3 优化效果检验

将最优尺寸导入有限元仿真模型进行验证, 优



(a) 屏蔽罩涡流损耗对比



(b) 电弧截面TMF分布径向不对称度对比

图 12 RBF 模型预测与期望输出对比

Fig.12 Comparison between RBF neural network model prediction and expected output

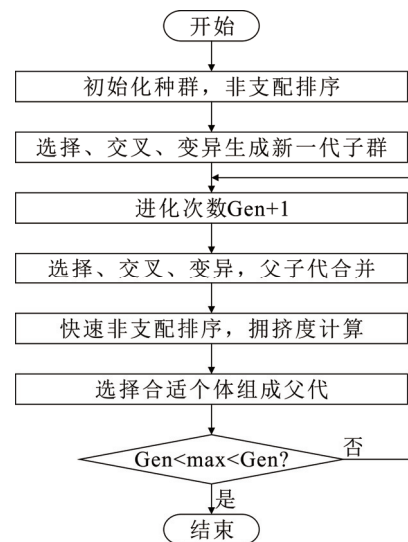


图 13 NSGA2 算法流程

Fig.13 Process of NSGA2 algorithm

化效果对比见表 5, 且得到触头片电流密度分布和电弧截面的 TMF 分布(见图 15、图 16), 以及屏蔽

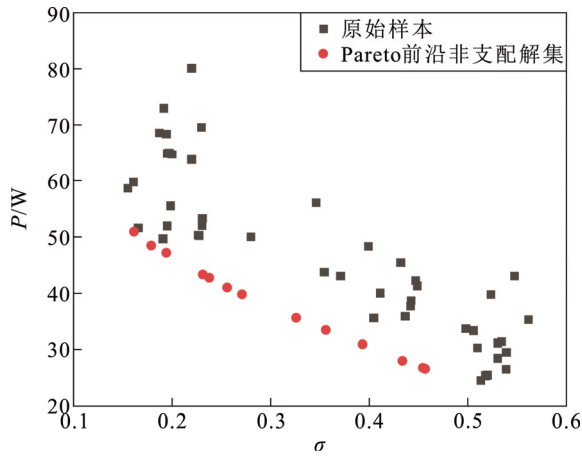


图 14 Pareto 前沿非支配解集

Fig.14 Pareto frontier non-dominated solution set

表 5 优化效果对比与验证

Table 5 Comparison and test of optimization effect

条件	d_1/cm	d_2/cm	d_3/cm	d_4/cm	σ	P/W
无屏蔽罩					0.668 9	0
优化前	5	5	130	250	0.334 5	59.65
优化后	14.50	5.53	110.12	258.81	0.232 6	40.55
仿真验证	14.50	5.53	110.12	258.81	0.236 5	41.55
误差					1.68%	2.5%

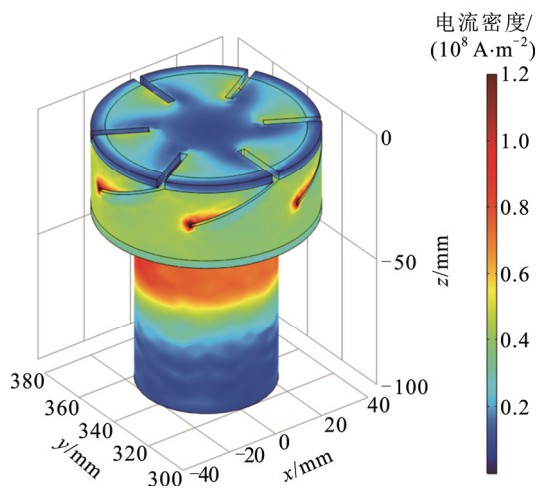


图 15 屏蔽后的触头片电流密度分布

Fig.15 Distribution of current density in the contact plate after shielding

罩涡流损耗分布(见图 17)。由图 15、图 16 可知,相较于无屏蔽罩(见图 3、图 4),该情况下远离邻路侧和靠近邻路侧触头片电流密度的差异减小,触头片电流分布更均匀;电弧截面总横磁最小值所在位置与圆心的距离明显减小,邻路横磁得到有效屏蔽。

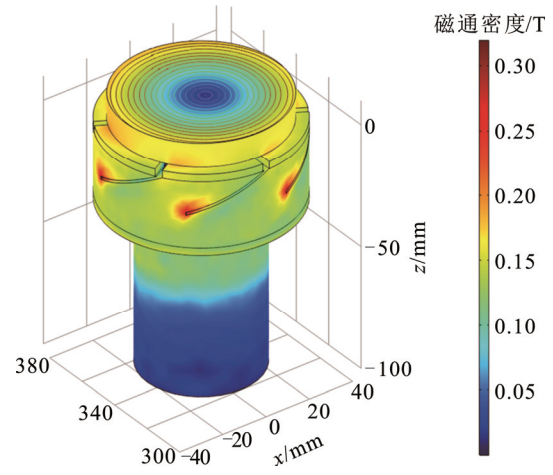


图 16 屏蔽后的电弧截面 TMF 分布

Fig.16 TMF distribution in cross-section of the arc after shielding

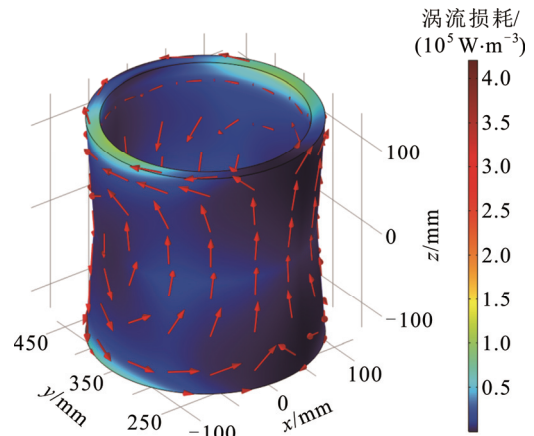


图 17 非等厚铝屏蔽罩涡流损耗分布

Fig.17 Distribution of eddy current loss in unequal thickness aluminum shielding cover

由图 17 可知,优化后的屏蔽罩开口处涡流损耗功率密度从 $4 \times 10^5 \text{ W/m}^3$ 减小为 $1 \times 10^5 \text{ W/m}^3$,涡流分布更加均匀。

由表 5 可知,优化后的铝屏蔽罩相较于优化前,径向不对称度 σ 由 0.668 9 减小至 0.232 6,涡流损耗 P 由 59.65 W 减小至 41.55 W,屏蔽罩的屏蔽特性和损耗特性均得到改善;将最优尺寸代入有限元模型,得到的径向不对称度 σ 和损耗 P 与预测结果误差分别为 1.68%和 2.5%,误差均较小,验证了 RBF-NSGA2 模型的准确性。

4 铝屏蔽罩瞬态屏蔽能力检验

在实际开断过程中,短路电流为 1 000 Hz 的 LC 振荡电流与原短路暂态电流叠加,而前文为了减小运算成本,仅仅考虑了幅值 30 kA、频率 1 000 Hz

的 LC 振荡电流, 采用频域求解器求解, 存在一定的误差。因此, 为还原实际开断过程, 需建立瞬态仿真模型, 同时考虑 LC 振荡电流与原短路暂态电流, 检验铝屏蔽罩的实际屏蔽能力。

百万千瓦发电机组额定电流 20 kA(单路 3.3 kA)以上, 短路电流 200 kA(单路 33.3 kA)以上。以三相短路故障为例, 将发电厂看作电压激励源 $u(t)$ 。

$$u(t) = U_1 \sin(\omega t + \theta_0) \quad (16)$$

式中: U_1 为额定电压幅值; θ_0 为短路起始时刻电压相位角。

额定工作电流为:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t + \theta - \varphi) \quad (17)$$

式中: I_1 为额定电流幅值; φ 为功率因数角。

当发生三相短路时, 根据基尔霍夫定律式(17), 并结合电流初始条件, 得到三相短路电流的全电流表达式(18)。

$$L \frac{di_k}{dt} + Ri_k = U_1 \sin(\omega t + \theta) \quad (18)$$

$$i_k(t) = I_{pm} \sin(\omega t + \theta - \varphi_k) + (I_1 \sin(\theta - \varphi) - I_{pm} \sin(\theta - \varphi_k)) e^{-t/T_k} \quad (19)$$

式中: I_{pm} 为短路电流周期分量的幅值; φ_k 为短路阻抗角, 接近 90° ; T_k 为指数衰减分量的时间常数, 取 150 ms 时为极端工况, 此时短路电流最大峰值可达 685 kA(单路约 114 kA)。

当短路故障电流即将经过第 1 个过零点时, 叠加中高频 LC 振荡电流 i_{LC} 。

$$i_{LC}(t) = A_{LC} \sin(\omega_{LC} t) \quad (20)$$

式中: A_{LC} 、 ω_{LC} 分别为 LC 振荡电流的幅值和频率。因此开断过程中的实际电流为中高频 LC 振荡电流与原短路电流 i_{k1} 的叠加, 参数见表 6。

$$i_k' = i_{LC} + i_{k1} \quad (21)$$

综上, 可以得到额定工况、短路故障未开断工况和短路故障开断工况下的电流波形, 见图 18, 该波形短路起始时刻电压相位角为 0° , 短路电流非周期分量具有最大幅值, 全短路电流的峰值达到 114 kA, 为三相短路最严苛工况。

由于短路时刻具有随机性, 因此短路起始时刻电压相位角 θ 随机分布在 0 到 2π 之间, θ 影响着短路电流的初始值及非周期分量的幅值, 是决定短路电流波形的主要因素, 从而影响屏蔽罩的屏蔽效果。依照图 18, 确定电流源波形, 选择具有代表性的情况: $\theta=0$ 、 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 、 $\pi/2$, 依据前文的有限元模型建立瞬态仿真模型, 研究上述 4 种情况下屏蔽罩对于

表 6 电流参数

Table 6 Current parameter

参数	数值
额定电流幅值 I_m/kA	7.071
功率因素角 $\varphi/^\circ$	20
短路电流周期分量幅值 I_{pm}/kA	58.92
短路阻抗角 $\varphi_k/^\circ$	80
时间常数 T_k/ms	150
LC 振荡角频率 ω_{LC}/Hz	1 000
LC 振荡幅值 A_{LC}/kA	30

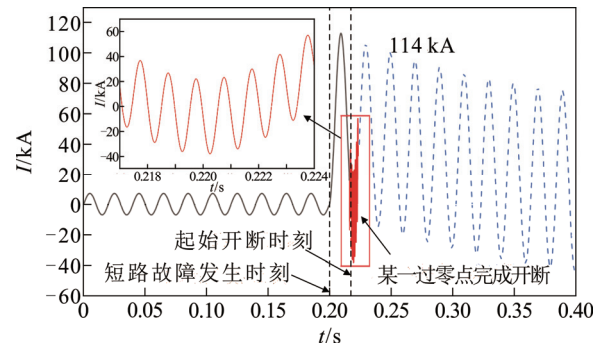


图 18 VCB 短路与开断电流

Fig.18 Breaking current and short-circuit current of VCB

邻路横磁的屏蔽效果, 见图 19。

根据邻路横磁的含义, 利用式(22)估算作用于电弧截面的平均邻路横磁矢量 B_{TMF1} :

$$B_{TMF1} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M B_i \quad (22)$$

式中: B_i 为第 i 个横磁观测点的磁感应强度矢量, 见图 11。当邻路横磁为 0 时, 电弧截面内的横磁仅由本路电流产生, 靠近邻路侧的横磁观测值与远离邻路侧的横磁观测值大小相等, 方向相反, 矢量相加即 $B_{TMF1}=0$ 。

由图 19 可知, 有屏蔽罩时, 电弧截面内邻路横磁 B_{TMF1} 幅值较无屏蔽罩有明显下降; 邻路横磁曲线有偏置, 偏置大小随着短路起始时刻电压相位角 θ 的增大而减小。

当 $\theta=0$ 时, 偏置最大, 有屏蔽罩时的邻路横磁最大值为 14 mT, 约为无屏蔽罩时的 1/3, 该情况下的短路电流非周期分量幅值最大, 短路开断电流的低频分量最多, 而铝屏蔽罩对于低频横磁的屏蔽能力有限, 因此该情况下的横磁偏置最大; 当时 $\theta=\pi/6$ 、 $\pi/3$, 偏置减小, 有屏蔽罩时的邻路横磁最大值分别为 12.2、10.0 mT, 约为无屏蔽罩时的 1/4 和 1/5.5; 当 $\theta=\pi/2$ 时, 偏置最小, 有屏蔽罩时的邻路横磁最

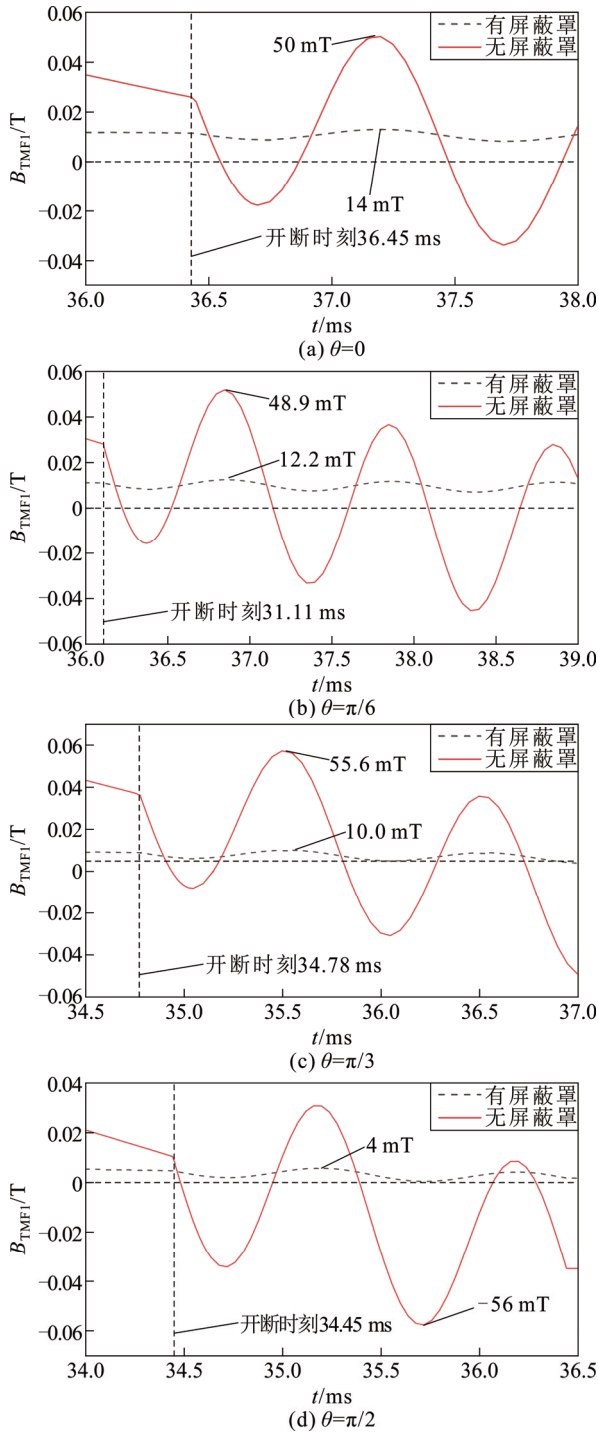


图 19 TMF 瞬态特性曲线

Fig.19 Transient characterization of TMF

大值为 4 mT, 约为无屏蔽罩时的 1/13, 该情况下的短路电流非周期分量幅值最小, 短路开断电流的低频分量最少, 屏蔽效果最佳。

综上, 铝屏蔽罩能够有效屏蔽短路电流中的中高频分量, 但对于低频分量的屏蔽能力有限, 而开断过程中, 中高频分量占据主导地位, 为主要屏蔽对象, 铝屏蔽罩在三相短路情况下对于邻路横磁有

着较为明显的屏蔽效果。

5 结论

本文进行了 6 路并联 VCB 有限元仿真, 设计了一种非等厚铝屏蔽罩, 分析了铝屏蔽罩在 1 kHz 短路开断工况下的磁场分布特性和 50 Hz 额定工况下的涡流损耗特性, 并利用 RBF-NSGA2 优化模型得到了屏蔽罩的最优尺寸, 最后检验了铝屏蔽罩的瞬态屏蔽能力。得到以下结论:

1) 在频率 1 kHz 的短路电流作用下, 触头片电流分布出现较明显的邻近效应, 电弧截面 TMF 分布呈现较高的不对称度, 这两种现象均会对 VCB 电弧发展造成不利影响, 从而影响 VCB 开断性能。

2) 铝屏蔽罩长度和半径会对邻路 TMF 屏蔽效果造成影响; 50 Hz 额定工况下的涡流集中分布在铝屏蔽罩开口处。上述特性可以作为屏蔽罩尺寸优化的依据。

3) RBF 神经网络模型具有较高的预测精度, 结合 NSGA2 优化算法, 当屏蔽罩开口处厚度为 14.50 mm、中部厚度为 5.53 mm、半径为 110.12 mm、长度为 258.81 mm 时, 屏蔽罩具有较高的屏蔽能力和较小的涡流损耗。经检验, 屏蔽后的电弧截面横磁径向不对称度 σ 由 0.668 9 减小至 0.232 6, 涡流损耗 P 由 59.65 W 减小至 41.55 W, 屏蔽罩的屏蔽特性和损耗特性均得到改善。

4) 铝屏蔽罩能够有效屏蔽短路电流中的中高频分量, 对于低频分量的屏蔽能力有限, 而开断过程中, 中高频分量占据主导地位, 为主要屏蔽对象, 铝屏蔽罩在三相短路情况下对于邻路横磁有着较为明显的屏蔽效果。

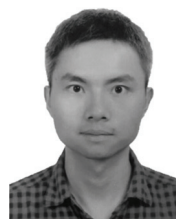
参考文献 References

- [1] HAN X Y, YANG F, CHEN H B, et al. Parallel current-sharing characteristics of vacuum multi-breakers for large-capacity generator circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1162-1173.
- [2] 钟建英, 孙广雷, 杨葆鑫, 等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 451-466. ZHONG Jianying, SUN Guanglei, YANG Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.
- [3] 马飞越, 姚晓飞, 刘志远, 等. 2/3 匝线圈式纵磁触头大开距真空断路器分闸速度设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(13): 4139-4152. MA Feiyue, YAO Xiaofei, LIU Zhiyuan, et al. Design of opening velocities for large-gap vacuum circuit breakers with 2/3 coil-type axial magnetic field contacts[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(13): 4139-4152.
- [4] YAO X F, WANG J H, AI S G, et al. Vacuum switching technology for future of power systems[J]. Engineering, 2022, 13: 164-177.

- [5] 葛国伟, 程显, 张鹏浩, 等. 多断口真空开关不平衡磁场计算与优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1535-1541.
GE Guowei, CHENG Xian, ZHANG Penghao, et al. Calculation and optimization of the unbalanced magnetic field in multi-break VCBs[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1535-1541.
- [6] 杨嘉祥, 张楠, 周恩平, 等. 恒定磁场下水中交流电弧放电的特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1760-1765.
YANG Jiexiang, ZHANG Nan, ZHOU Enping, et al. Characteristics of AC Arc discharge in water with constant magnetic field[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1760-1765.
- [7] PEDROW P, BURRAGE L, SHOHEJ J. Performance of a vacuum Arc commutating switch for a fault-current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(5): 1269-1277.
- [8] EMTAGE P R, KIMBLIN C W, GORMAN J G, et al. Interaction between vacuum Arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1980, 8(4): 314-319.
- [9] FANG D Y. Cathode spot velocity of vacuum arcs[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1982, 15(5): 833-844.
- [10] 贾申利, 闫静, 付军, 等. 一种用于真空灭弧室的磁屏蔽罩[J]. 高压电器, 1999(2): 13-16.
JIA Shenli, YAN Jing, FU Jun, et al. A magnetic shielding cover for vacuum interrupters[J]. High Voltage Apparatus, 1999(2): 13-16.
- [11] 黄小龙, 王立军, 贾申利, 等. 纵向磁场和外部横向磁场共同作用下真空电弧偏移与阳极偏烧现象的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 941-946.
HUANG Xiaolong, WANG Lijun, JIA Shenli, et al. Simulation research of deflection phenomenon of vacuum arc and anode erosion under the combined action of axial magnetic field and external transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 941-946.
- [12] 舒胜文, 阮江军, 黄道春, 等. 126 kV 3 断口真空断路器的重燃特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 999-1005.
SHU Shengwen, RUAN Jiangjun, HUANG Daochun, et al. Re-ignition characteristics of 126 kV vacuum circuit breaker with triple breaks[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 999-1005.
- [13] 袁涛, 唐塘, 司马文霞, 等. 融合实测数据的配网断路器投切暂态过电压建模方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1555-1563.
YUAN Tao, TANG Tang, SIMA Wenxia, et al. Switching transient overvoltage modeling method for circuit breaker in distribution networks based on measured data[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1555-1563.
- [14] 董冰冰, 陶磊, 李志兵, 等. 机械式直流断路器换流支路用气体间隙开关方案及其诱导击穿特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4863-4872.
DONG Bingbing, TAO Lei, LI Zhibing, et al. A gas gap switch scheme for commutation branch of DC circuit breakers and its induced breakdown characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4863-4872.
- [15] 张宁, 李琳. 35 kV 空心电抗器工频磁场最优抑制方式的研究分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 125-130, 135.
ZHANG Ning, LI Lin. Research analysis of the optimal inhibition of power frequency magnetic field of 35 kV air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 125-130, 135.
- [16] 赵辉. 谐振式无线电能传输系统电磁安全性与屏蔽技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
ZHAO Hui. Research on electromagnetic safety and shielding technology of resonant wireless power transmission system[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [17] 林磊, 谭林丰, 钟和清, 等. 脉冲强流环境中磁场辐射干扰对充电电源的影响及其抑制措施[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1974-1980.
LIN Lei, TAN Linfeng, ZHONG Heqing, et al. Influence of magnetic radiation interference on charging power supply in intense pulse current environment and its suppression methods[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1974-1980.
- [18] 丁璨, 王周琳, 袁召, 等. 基于多目标灰狼优化算法与 RBF 神经网络的真空灭弧室触头结构优化设计[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 543-550.
DING Can, WANG Zhoulin, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of vacuum interrupter contact based on multi-objective grey wolf optimization algorithm and RBF neural network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 543-550.
- [19] 杨晓丽, 黄宏光, 舒勤, 等. 基于 SVD 和低秩 RBF 神经网络的局部放电信号提取方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3608-3616.
YANG Xiaoli, HUANG Hongguang, SHU Qin, et al. Partial discharge signal extraction method based on SVD and low rank RBF neural network[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3608-3616.
- [20] 丁璨, 李江, 袁召, 等. 基于 NSGA-II 和 BP 神经网络的杯状纵磁触头结构优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(23): 6074-6082.
DING Can, LI Jiang, YUAN Zhao, et al. Structural optimization design of cup-shaped longitudinal magnetic contact based on NSGA-II and BP neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(23): 6074-6082.
- [21] DOERR B, QU Z D. A first runtime analysis of the NSGA-II on a multimodal problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2023, 27(5): 1288-1297.
- [22] PANG L M, ISHIBUCHI H, SHANG K. NSGA-II with simple modification works well on a wide variety of many-objective problems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 190240-190250.
- [23] 徐鹏, 梁少华. 可调间隙防雷装置在 35 kV 变电站防雷中的应用研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 7-15.
XU Peng, LIANG Shaohua. Application of gap-adjustable lightning protection device to lightning protection of 35 kV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 7-15.
- [24] 艾嘉伟, 徐乐平, 牛海清, 等. 空气正极性电晕放电微观仿真及模型系数对脉冲电流特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4377-4387.
AI Jiawei, XU Leping, NIU Haiqing, et al. Micro-simulation of air positive corona and the influence of model coefficient on pulse current characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4377-4387.
- [25] QIU Z B, RUAN J J, HUANG D C, et al. A prediction method for breakdown voltage of typical air gaps based on electric field features and support vector machine[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 2125-2135.



LI Yingzhuo

CHEN Lixue
Ph.D., Professor
Corresponding author

李颖卓

2001—, 男, 硕士

主要从事多路并联真空断路器磁场优化的研究

E-mail: 2893330506@qq.com

陈立学(通信作者)

1984—, 男, 博士, 教授

主要从事脉冲功率技术和高电压技术及电磁发射技术等方面的研究

E-mail: chenlixue@hust.edu.cn