第 52 卷 第 6 期：2597-2608 高电压技术 Vol.52, No.6: 2597-2608
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250472

基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计方法

李 昊[1]，赵文彬[1]，王 亚[1]，赵义焜[2]，毕建刚[2]，丁 超[3]
（1. 上海电力大学电气工程学院，上海 200090；2. 中国电力科学研究院有限公司，北京 100192；
3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，杭州 310000）

摘 要：为了解决低频电力变压器尺寸与质量增大的问题，提出了基于高温绝缘系统的低频变压器的轻量化设计方法。通过试验测得低频和工频条件下矿物油、合成酯以及合成酯油纸绝缘系统的击穿特性，探究频率的改变对绝缘材料击穿特性的影响，为优化设计奠定基础。将材料特性与多目标遗传算法相结合，构建质量-尺寸-损耗综合优化模型。以 330 MVA/220 kV 变压器为例，通过与低频输电工程所用同型号低频变压器对比，分析优化方案的有效性，优化后总质量降低 12.7%，油箱尺寸缩减 12.05%，并且不超过同型号工频变压器质量与尺寸的 1.5 倍，并结合温度场和电场仿真对优化结果进行验证。全生命周期成本分析显示，采用高温绝缘系统的低频变压器维护成本更低，全生命周期成本较传统矿物油方案减少 7.36%，研究成果可为低频变压器轻量化设计提供优化方案。
关键词：低频油浸式变压器；轻量化设计；合成酯；高温绝缘系统；有限元仿真；全生命周期成本分析

Lightweight Design Method of Low-frequency Transformers Based on High-temperature Insulation Systems

LI Hao[1], ZHAO Wenbin[1], WANG Ya[1], ZHAO Yikun[2], BI Jiangang[2], DING Chao[3]
(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. China State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to solve the problem of increasing the size and weight of low-frequency power transformer, a lightweight design method of low-frequency transformer based on high-temperature insulation system is proposed. The breakdown characteristics of mineral oil, synthetic ester, and synthetic ester oil paper insulation system under low frequency and power frequency conditions were measured through experiments, and the influence of frequency change on the breakdown characteristics of insulation materials was explored, which laid the foundation for the optimization design. By combining the material properties with multi-objective genetic algorithm, a weight size loss comprehensive optimization model is constructed. A 330 MVA/220 kV transformer is taken as an example, and the effectiveness of the optimization scheme is analyzed by comparing with the same type of low-frequency transformer used in low-frequency transmission projects. After optimization, the total weight is reduced by 12.7%, and the tank size is reduced by 12.05%, which is not more than 1.5 times of the weight and size of the same type of power frequency transformer. The optimization results are verified by temperature field and electric field simulation. The life cycle cost analysis shows that the maintenance cost of low-frequency transformer with high-temperature insulation system is lower, and the life cycle cost is reduced by 7.36% compared with the traditional mineral oil scheme. The research results can provide an optimization scheme for the lightweight design of low-frequency transformer.
Key words: low-frequency oil-immersed transformer; lightweight design; synthetic esters; high-temperature insulation system; finite element simulation; whole-life cost analysis

0 引言

加快海上风电大规模开发已成为国际能源转型前沿领域，也是我国实现“双碳”战略目标和保障能源安全供应的重要途径，当前海上风电正向深远海域、规模化开发方向发展[1]。探索远距离、大容量的柔性低频交流输电方式，是我国未来海上风电发展的关键[2]。尽管我国近年已建成 220 kV 中埠—亭山和 35 kV 台州等典型柔性低频输电示范工程[3-4]，但在大容量远距离海上输电场景中，设备的

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401100)；国家电网公司科技项目(柔性低频输电关键技术)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401100), Science and Technology Project of SGCC (Key Technologies for Flexiblelow-frequency Transmission).

研发与选型仍面临多重挑战。

低频变压器是柔性低频输电工程中关键的设备之一，然而频率降低会导致低频变压器的质量和尺寸远大于同容量、同电压等级的工频变压器，并且绕组线圈的导电材料用量也会显著增加。文献[5]揭示，通过调整绕组匝数进行结构优化的 50/3 Hz 低频变压器，其质量与体积分别出现 77%和 75.5%的显著增幅。根据文献[6]的计算结果，在磁密和绕组匝数均保持不变的情况下，19 Hz 低频变压器与工频变压器相比，其铁芯截面积需扩大至原本的 1.77 倍，同时成本上升幅度达到 70%至 80%。文献[7]以 220 kV 双绕组分裂变压器为例，计算了 20 Hz 低频变压器在质量(1.7 倍)和体积(1.5 倍)维度相对工频变压器的增幅，为工程实践提供了量化参考。对变压器的质量和体积的优化是低频变压器设计的关键，当前如何实现海上低频变压器的小型化和轻量化已成为一个工程领域亟待解决的问题。

实际上，变压器的减重和缩减尺寸的方法，是电气设备领域一项长期、持续的研究。但是，长期以来变压器制造、运行等领域大多数设计优化研究都是以降损、降成本和提高计算效率为主线，但对质量优化并未上升为变压器设计的核心优化目标。文献[8]试验性地运用遗传算法(GA)对变压器进行优化设计，发现该算法在处理简单电力变压器优化问题时具有显著优势。文献[9]在确保电炉变压器性能达标的基础上，采用 GA 进行优化设计，成功提升了电炉变压器的性能并削减了成本，此方法具有广泛的应用潜力。文献[10]运用 T-ψ 有限元法对变压器进行多目标优化研究，旨在提升其性能和降低成本，仿真实验显示了优化方法的有效性。文献[11]为克服变压器优化设计中的时间漫长、效率低、成本高问题，引入了混沌自适应遗传算法，该算法在优化变压器参数方面更高效。文献[12]针对变压器在最大减排量和最小发电成本的多目标优化问题，采用多目标粒子群算法求解，得出了最佳方案。

针对海上风电柔性低频输电系统中低频变压器铁芯尺寸大、质量高的问题，文献[13]提出一种基于遗传算法的轻量化设计方法，旨在解决设备运输、安装及空间限制的难题。文献[14]分析了频率改变对铁芯材料和变压器电磁性能的影响，利用有限元软件建立了低频变压器的参数化模型，采用多种优化方法对参数进行优化，选取最优样本从而验证优化设计方案的有效性。但他们并未考虑变压器组成材料的相关特性在变压器优化中的影响，只依靠调整设计方法，对于变压器体积和质量的优化程度有限。

为了进一步缩减变压器的质量与尺寸，国内外专家致力于高温绝缘材料液浸式变压器技术的研制，文献[15]详细阐述了采用高温绝缘材料的油浸式变压器的温升特性，以及其在设计和实际应用中的核心问题。文献[16]指出高温绝缘材料的应用为变压器提供了设计更小质量和尺寸的可能性。文献[17]提出了一种基于高燃点植物绝缘油配电变压器的设计方法及其注意事项，并通过两个样机的实际测试进一步验证了该设计方法的可行性。文献[18]通过研究海上风电机组对变压器的需求结合变压器的实际应用经验，提出了一种瘦身型高燃点油浸式变压器的应用方案。文献[19]对比了 Midel 高燃点绝缘酯油与普通矿物油在使用及设计制造中的区别，并对 Midel 高燃点绝缘酯油在变压器中的应用和推广提出了建议。文献[20]针对海上升压站的具体特性和需求对变压器酯油类型和绝缘系统类型进行选型研究，通过深入对比分析和仿真计算探讨了酯类绝缘油在海上升压站 220 kV 电力变压器中应用的可行性。

综上所述，当前研究以降损和降成本为主线，高温绝缘材料相关研究虽为轻量化提供潜力，但质量的优化仍未上升为变压器设计的核心优化目标且 20 Hz 低频工况下的高温绝缘材料的特性尚不清晰。因此，本文对合成酯及合成酯油纸绝缘系统在低频 20 Hz 工况下的性能进行测试分析，并提出基于高温绝缘系统的低频电力变压器轻量化设计方法，并以 330 MVA/220 kV 变压器为例进行验证，为低频变压器优化设计提供系列设计参考。

1 绝缘系统低频特性分析

传统绝缘系统采用矿物油和纤维素纸，而高温系统选用酯类液体和耐高温固态材料。液态绝缘材料直接影响油浸式变压器冷却效率。天然酯与合成酯因分子结构差异，在防火性、耐湿性、生物降解率和抗氧化性上各具特点：天然酯更环保且防火性能优异，合成酯则具备高稳定性、抗氧化能力和卓越的耐湿性，能在高湿环境中保持较高击穿电压，尤其适用于海上风电等高盐高湿环境。因此，本文以合成酯为研究对象，搭建低频高压绝缘试验平台，测试高温绝缘系统的低频击穿特性。

1.1　合成酯低频特性

本文以合成酯和矿物油为研究对象，探究它们在 50 Hz 和 20 Hz 两种交流电作用下的击穿特性。试验平台示意图见图 1。其中，变频调压电源输出频率为 1 μHz~25 MHz，输出电压为 1 mV~10 V，采样频率为 125 MHz；高压功率放大器输出电压为 0~±30 kV，比率为 1 V/3 000 V；示波器采样频率为 5 GHz。

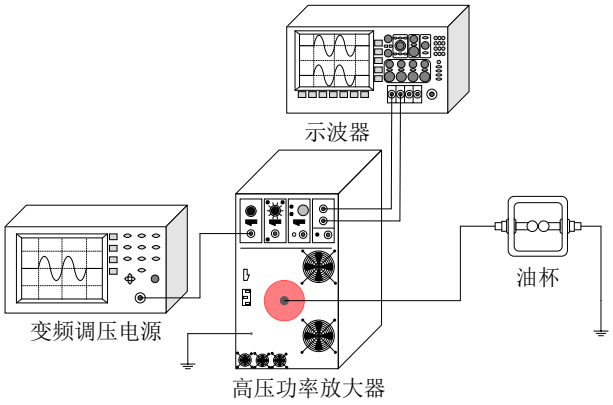


图 1　试验平台示意图

Fig.1　Schematic diagram of the test platform

试验前对油样进行过滤、真空干燥处理以除去油样中的杂质、水分和气泡。GBT1094-14《高温绝缘变压器》将绝缘系统划分成I类绝缘组合、II类绝缘组合和III类绝缘组合，其中III类绝缘组合的温升限值最高，顶层液体温升和绕组平均温升均为 85 K，考虑高温对合成酯击穿特性的影响，实验温度选择 20 ℃和 90 ℃，试验频率选择 50 Hz 和 20 Hz，采用球形电极(直径 12.5 mm)，油隙 0.3 mm，匀速缓慢加压至油样被击穿，每 5 次击穿后更换油杯内油样，每种频率下分别重复进行 20 次试验，记录击穿电压有效值，应用 Weibull 分布对击穿电压数据进行概率统计分析，试验结果见图 2 和图 3。

可得出以下结论：

1）相同频率下合成酯的击穿电压高于矿物油的击穿电压，合成酯拥有更好的绝缘性能。

2）合成酯的击穿电压随着频率的降低而升高，以 50 Hz 下的击穿电压为基准，20 Hz 下的击穿电压提高 12.68%。

3）相较于 50 Hz 合成酯，20 Hz 条件下合成酯的击穿电压分散性较大，在 20 Hz 时的击穿电压可能出现与 50 Hz 相同甚至更低的情况。

4）合成酯的低频击穿电压随温度的升高略有下降，但并未低于 50 Hz、20 ℃工况下的击穿电压。

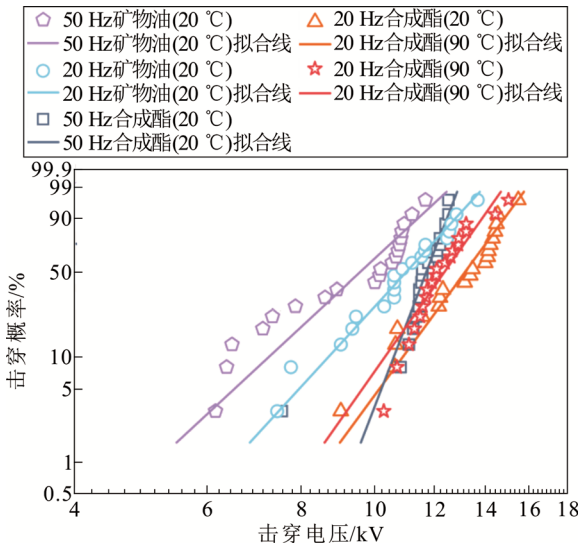


图 2　绝缘油在不同频率下击穿电压的 Weibulll 概率图

Fig.2　Weibull probability diagram of breakdown voltage of insulating oil at different frequencies

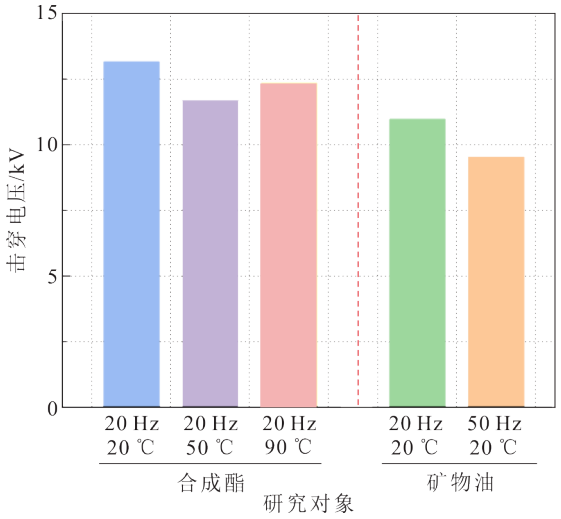


图 3　绝缘油不同频率下击穿电压(50%概率)对比图

Fig.3　Comparison diagram of breakdown voltage (50% probability) of insulating oil at different frequencies

1.2　油纸绝缘系统低频特性

为了探究频率的改变对油纸绝缘系统击穿特性的影响，采用图 1 所示高压低频试验平台。油样处理同 1.1 节，并对绝缘纸进行真空干燥 48 h 处理以除去绝缘纸中的水分。同样考虑高温对合成酯油纸绝缘系统击穿特性的影响，实验温度选择 20 ℃和 90 ℃，试验频率选择 50 Hz 和 20 Hz，采用球形电极(直径 12.5 mm)，绝缘纸 0.1 mm 厚(耐热等级 B 级)，击穿结构如图 4 所示。

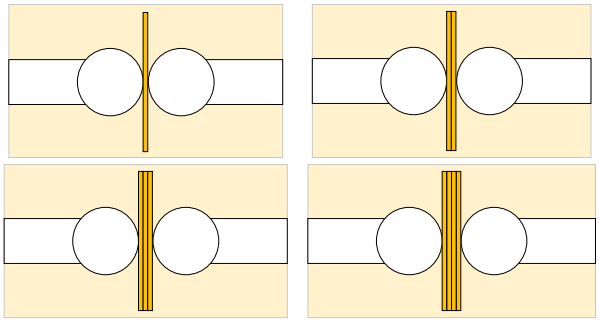


图 4 击穿结构模型图

Fig.4 Model diagram of breakdown structure

匀速缓慢加压至油样被击穿，每 5 次击穿后更换油杯内油样，每种频率下分别重复进行 20 次试验，记录击穿电压有效值，应用 Weibull 分布对击穿电压数据进行概率统计分析，试验结果如图 5 和图 6 所示。

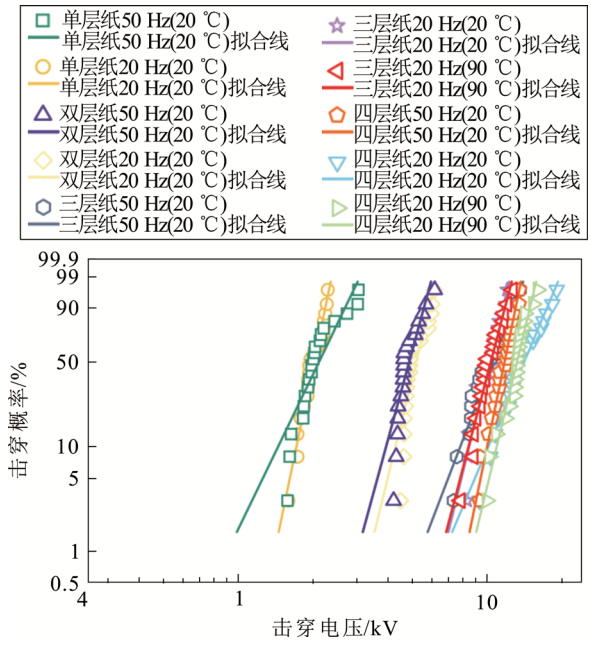


图 5 油纸绝缘系统在不同频率下击穿电压的 Weibulll 概率图

Fig.5 Weibull probability diagram of breakdown voltage of oil paper insulation system at differ rent frequencies

可得出以下结论：

1）随着绝缘纸层数的增加，合成酯油纸绝缘系统的击穿电压逐渐升高。

2）频率的改变对合成酯油纸绝缘系统的击穿电压影响不大。

3）高温使合成酯油纸绝缘系统的低频击穿电压略有下降。

综上所示，考虑到合成酯在 20 Hz 条件下击穿电压的分散性较大，加之频率和温度的改变对合成酯油纸绝缘系统的击穿电压影响不大，在应用合成酯油纸绝缘系统进行低频变压器优化设计时不宜缩减变压器的绝缘裕度。采用高温绝缘系统主要影响变压器的温升限值，而变压器的其他参数则取决于其铁芯和线圈的结构。

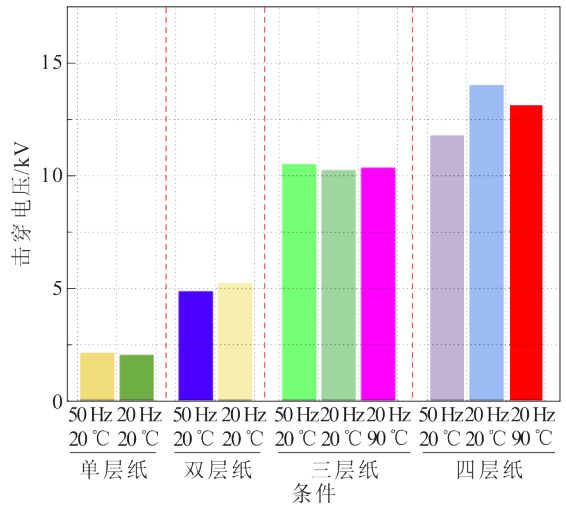


图 6 合成酯油纸绝缘系统不同频率下击穿电压(50%概率)对比图

Fig.6 Comparison diagram of breakdown voltage (50% probability) of synthetic ester oil paper insulation system under different frequencies

2 基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计方法

2.1 轻量化设计思路及流程

基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计思路如图 7 所示，采用高温绝缘系统可以提高变压器整体的耐热性能，进而提升变压器的温升限值。更高的温升限值就给变压器铁芯与绕组的设计带来了更多的可能。优化流程如图 8 所示，本文采用多目标遗传算法(NSGA-II)，在变压器电磁计算与结构设计中，对优化变量进行寻优，并基于工程实际对优化结果进行修正，确定最终的优化方案。

2.1.1 铁芯油道设置

铁芯的各级之间是否设置油道，需根据铁芯的温升计算来确定。铁芯的允许温升为 80 ℃，铁芯对油的温升为：

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{1}$$

式中：Q_1 为铁芯表面对油温升，℃；Q_2 为铁芯内部对铁芯表面温升，℃。

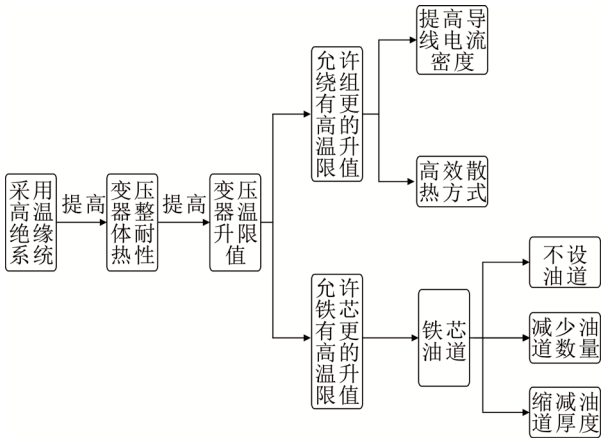


图 7　基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计思路

Fig.7　Optimization design concept diagram for low-frequency transformers based on high-temperature insulation systems

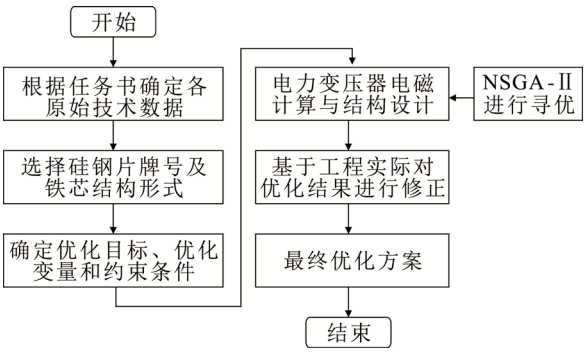


图 8　优化流程图

Fig.8　Optimization flowchart

铁芯表面对油温升 Q_1 可按以下式子进行计算。

自然油循环冷却：

$$Q_1 = 0.35q_0^{0.6} \tag{2}$$

强迫油循环冷却：

$$Q_1 = 0.31q_0^{0.6} \tag{3}$$

铁芯内部对铁芯表面温升 Q_2 可按下式计算：

$$Q_2 = 28P_C(1+\frac{C}{100})a^2K\times10^{-4} \tag{4}$$

式中：q_0 为铁芯表面热负荷，W/m²。

$$q_0 = P_C(1+\frac{C}{100})\cdot\frac{30.8ab}{ma+b} \tag{5}$$

式中：P_C 为硅钢片单位铁损，W/kg；C 为校正系数，%；a 为铁芯级块中的最大片宽，cm；b 为两油道间迭厚，无油道为总叠厚，cm；K 为系数，$K=10b^2/(a^2+10b^2)$。根据计算得到的铁芯对油温升与标准进行比较，来决定铁芯中设置的油道数量。

2.1.2　绕组设计

1）绕组电流密度选择

采用高温绝缘系统提升变压器温升限值，可以放宽对变压器损耗的要求。变压器的负载损耗是在其运行过程中产生的，除了基本损耗之外，还存在附加损耗。其中，基本损耗是由绕组的直流电阻决定的，因此，频率的变化几乎不会对其数值产生影响，绕组的直流电阻损耗计算式如下：

$$P_R = nI_{xg}^2R = nI_{xg}^2\rho\frac{L_N}{S} \tag{6}$$

式中：P_R 为绕组的直流电阻损耗，W；n 为系数，单相变压器取 2，三相变压器取 3；I_{xg} 为相电流，A；R 为线圈导线的直流电阻，Ω；ρ 为电阻系数，Ω·mm²/m，铜绕组取 0.230 7 Ω·mm²/m(100 ℃)；L_N 为额定电压时线圈导线长度，m；S 为线圈导线的总截面积，mm²。

在变压器设计时，线圈导线的总截面积初定由导线电流密度决定：

$$S = \frac{I_{xg}}{\Delta} \tag{7}$$

式中：Δ为导线电流密度，A/mm²。

由式(8)和(9)可知，放宽对变压器损耗的要求后，可以提高导线的电流密度，进而缩减导线的总截面积，从而在一定程度上降低变压器的材料使用量。在选择变压器绕组电流密度时，铜导线电流密度通常不会超过 4.5 A/mm²。变压器厂在采用常规绝缘系统设计变压器时，一般选择在 3.5 A/mm² 左右。采用高温绝缘系统后，铜导线的电流密度可以选择在 4.5 A/mm² 左右。由式(9)可知，在同一电流下，铜导线电流密度从 3.5 A/mm² 提高到 4.5 A/mm² 后，导线总截面积缩小为原来的 0.778 倍。

2）绕组油道设置

绕组油道是绝缘油流动的通道，通过油流的循环能够有效地散去变压器内部的热量，这对于控制变压器的温升至关重要。同时，绕组油道的尺寸直接决定了绕组的高度，这在一定程度上也影响了变压器的经济性能指标。

采用高温绝缘系统的油浸式变压器，需要高效的冷却能力以保证其良好的散热性能，因而采用强迫油循环风冷方式。与油浸自冷、油浸风冷等冷却方式不同的是，油循环风冷冷却方式的变压器绕组中水平油流的速度由绕组油道的大小决定，油道尺寸越小，油流速越高，绕组的铜油温差越低[21-22]。因此，对于采用 ODAF 冷却方式的变压器来说，保持绝缘性能良好的同时减小油道的尺寸，不仅可以

节约材料成本，还能够有效减少绕组的温度升高。

2.2 优化目标及目标函数

本文聚焦于适用于海上柔性低频交流输电系统的低频变压器。由于海上升压平台的空间有限，变压器需追求紧凑化，这对其体积和质量提出了更为严格的性能要求。进一步地，鉴于中远海距离运维和维修的复杂性，低频变压器的运行损耗也成为了一个关键的优化考量。

目标函数采用多目标优化模型，包含：

1）质量最小化

$$\min f_1 = G_{\mathrm{Fe}} + G_{\mathrm{Cu}} \tag{8}$$

式中：f_1 为质量目标函数；G_{Fe}、G_{Cu} 分别为铁芯和绕组质量。

(1)单相双柱式或三相三柱式铁芯总质量

$$G_{\mathrm{Fe}} = G_{\mathrm{Fe1}} + G_{\mathrm{Fe2}} = a_1\rho_1 H_0 A_{\mathrm{t}} \times 10^{-4} + b_1\rho_1 M_0 A_{\mathrm{c}} \times 10^{-4} + G_0 \tag{9}$$

式中：G_{Fe}、G_{Fe1}、G_{Fe2} 分别为和铁芯总质量、铁芯质量和铁轭质量，kg；a_1、b_1 为系数，单相时 a_1=2，b_1=2，三相时，a_1=3，b_1=4；H_0 为铁芯窗高，mm；M_0 为铁芯柱中心距，mm；A_{t} 为铁芯柱截面积，cm^2；A_{c} 为铁轭截面积，cm^2；G_0 为角重，kg；ρ_1 为硅钢片质量密度，7.65 g/cm^3。

(2)三相三柱旁轭式(三相五柱式)铁芯总质量

$$G_{\mathrm{Fe}} = G_{\mathrm{Fe1}} + G_{\mathrm{Fe2}} + G_{\mathrm{Fe3}} + G_{\mathrm{Fe4}} = 3\rho_1 H_0 A_{\mathrm{t}} \times 10^{-4} + 4\rho_1 M_0 A_{\mathrm{c}} \times 10^{-4} + G_0 + 4\rho_1 M_0' A_{\mathrm{c}}' \times 10^{-4} + 2\rho_1 H_0 A_{\mathrm{c}}' \times 10^{-4} \tag{10}$$

式中：M_0' 为铁芯柱(A、C 相)中心至相邻旁轭中心距，mm；A_{c}' 为旁铁轭截面积，mm^2。

(3)绕组质量

$$G_{\mathrm{Cu}} = cLAg \times 10^{-3} \tag{11}$$

式中：G_{Cu} 为裸导线质量，kg；c 为系数，单相变压器 c=2，三相变压器 c=3；L 为导线总长，m；A 为导线总截面积，mm^2；g 为导线的比重，铜导线 g=8.9 g/cm^3。

2）尺寸紧凑化

$$\min f_2 = L_1 WH = D + 2(M_0 + \mu M_0') + B_1 + D + B_2 + H_0 + 2H_{\mathrm{e}} + H_{\mathrm{d}} + H_1 \tag{12}$$

式中：f_2 为尺寸目标函数；L_1、W、H 分别为变压器长、宽、高，mm；μ 为系数，三相三柱式取 0，三相五柱式取 1；B_1 为长轴方向 A、C 相外线圈对油箱空隙，取 300~360 mm；D 为外线圈直径，mm；B_2 为高低压侧对油箱空隙，取 440~500 mm；H_{e} 为铁轭最大片宽，即铁轭高度，mm；H_{d} 为垫脚高，取 32~40 mm；H_1 为铁芯至箱盖距离，取 90~120 mm。

3）损耗最小化

$$\min f_3 = P_{\mathrm{Fe}} + P_{\mathrm{Cu}} = k_1 P_{\mathrm{C}} G_{\mathrm{Fe}} + k_2 \Delta^2 G_{\mathrm{Cu}} \frac{L_{\mathrm{N}}}{L} \tag{13}$$

式中：f_3 为损耗目标函数；P_{Fe}、P_{Cu} 为铁损和铜损；k_1 为附加损耗系数，与铁芯工艺有关，一般取 1.05~1.08；k_2 为系数，铜导线为 2.4。

4）多目标优化函数

$$\min h(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x)\} \tag{14}$$

式(14)定义了同时最小化质量、尺寸和损耗的多目标优化问题，通过 NSGA-II算法求解 Pareto 最优解集。相比于传统遗传算法，NSGA-II可较好地实现多目标优化，而不存在传统的遗传算法中需各目标进行归一化加权处理的问题[23]。对质量和尺寸的侧重体现在最终方案的选择策略上，而非优化算法内部的数学权重赋值。

2.3 优化变量

2.3.1 铁芯工作磁密

变压器感应电压计算式为：

$$U_{\mathrm{N}} \approx 4.44 f N B_{\mathrm{m}} S \tag{15}$$

式中：f 为频率，Hz；N 为线圈匝数；B_{m} 为铁芯最大工作磁密，T；S 为铁芯截面积，cm^2。

在维持电压水平不变的情况下，对于低频变压器的优化策略，除了扩展铁芯有效横截面积和提升绕组线圈匝数这两种途径之外，铁芯的工作磁密亦是一个值得考虑的改进方向。目前制造大型电力变压器铁芯选取的是高磁感(B_{800}≥1.88 T)硅钢片，考虑其能在 105%的额定电压下运行以及某些特殊使用情况下还能在不超过其 110%额定电压下运行，变压器的设计磁密应控制在 1.88 T/(1.05~1.1)即 1.71~1.79 T。若应用超高磁感(B_{800}≥1.93 T)硅钢片可以进一步提高设计磁密，变压器设计磁密可以控制在 1.75~1.84 T。因此，本文在铁芯磁通未达到饱和状态的条件下，将工作磁密设定为优化变量之一。在确保满足温升限值同时，通过适当地增加铁芯工作磁密，旨在缩减变压器的铁芯尺寸，从而减轻有效材料的质量和整体的运输尺寸。

2.3.2 绕组电流密度

高温绝缘系统的应用使导体热负荷承载能力提升，从而有效拓展了电流密度的设计裕度。因此，不再采用将选择导线截面几何参数(高度与宽度)作为变压器优化设计变量的传统方法，转而构建以电

流密度Δ和导线高度 b 为核心的多维优化参数集。这种转变不仅表征了电磁力与热应力的耦合作用，还实现了绕组空间利用率与动态稳定性的协同提升。

2.3.3　绕组油道尺寸

通过调整绕组油道尺寸，可以实现散热效率提升、温升控制、材料成本节约及冷却系统适配性优化等多重目标，是平衡变压器技术性能与经济性能的关键设计维度。尤其在高温绝缘系统中，油道尺寸的优化对保障变压器可靠性和经济性具有不可替代的作用。

2.4　约束条件

2.4.1　电压比较核

1）主分接时电压比的校核

$$\left|\frac{U_{\mathrm{xg}}-U'_{\mathrm{xg}}}{U_{\mathrm{xg}}}\right|\le 0.25\% \tag{16}$$

式中：U_{xg} 为相电压(标准值)；U'_{xg} 为计算的相电压。

2）具有分接的线圈电压比较核

高压线圈具有分接电压比的校核，通常首先校核主分接，然后校核最大和最小分接，主分接电压比的校核同式(16)，最大和最小分接的电压比校核按下式：

$$\left|\frac{U_{\mathrm{xgi}}-U'_{\mathrm{xgi}}}{U_{\mathrm{xgi}}}\right|\le \frac{U_{\mathrm{x}}}{10}\times\frac{1}{2}\le 1\% \tag{17}$$

式中：U_{xgi} 为最大(最小)分接的标准电压；U'_{xgi} 为最大(最小)分接电压的计算值。

2.4.2　温升限值

按照表 3，以III类绝缘组合中的绕组平均温升为限值，即

$$\Delta T_{\mathrm{w}}\le 85\ \mathrm{K} \tag{18}$$

式中：ΔT_{w} 为绕组平均温升。

2.4.3　短路阻抗百分比

选择短路阻抗百分比作为约束条件，能够综合平衡低频变压器的短路电流限制、电压稳定性、效率、温升、材料成本和系统兼容性等多重目标。尤其在低频场景下，频率变化对漏抗和磁通密度的显著影响，使得短路阻抗百分比成为确保设计合理性和可靠性的核心约束参数。一般大型电力变压器：

$$10\%\le u_{\mathrm{k}}\le 15\% \tag{19}$$

式中：u_{k} 为短路阻抗百分比。

2.4.4　工艺参数技术规范

1）绕组导线选型：本文采用纸包扁铜线，该类型导线的几何尺寸需满足以下要求：宽度不超过 18 mm，厚度控制在 5.6 mm 以内，该参数范围可确保绕组结构的紧凑性与电磁性能的稳定性。

2）铁芯加工技术标准：叠片宽度依据铁芯数据表进行选取。

3　算例分析

3.1　优化分析

本文根据国家标准及变压器设计规范[24]，按照 330 MVA/220 kV 低频变压器的产品规格及技术要求，如表 1 所示，计算得到变压器铁芯、绕组的原始结构，如表 2 所示。

表 1　低频变压器产品规格及技术要求

Table 1　Product specifications and technical requirements of low-frequency transformer

电气参数	数值
额定容量/MVA	330/330/1.8
额定电压/kV	230/66/10.5
额定电流/A	828.372/2 886.751/57.143
额定频率/Hz	20
联结组号	YN,yn0,+d11
铁芯结构	三相五柱式
负载损耗/kW	1 180
空载损耗/kW	70

表 2　低频变压器铁芯、绕组的原始结构参数

Table 2　Initial structural parameters of iron core and winding of low frequency transformer

参数		数值
铁芯直径/mm		1 420
铁芯截面积/cm^2		14 914.235
铁芯窗高/mm		2 245
芯柱中心距/mm		2 523
旁柱中心距/mm		1 730
绕组高度/mm		1 885
电流密度/(A·mm^{-2})	高压绕组	3.3
	中压绕组	3.47
	低压绕组	0.17
匝间油道/mm	高压绕组	5
	中压绕组	4
	低压绕组	3.5
辐向宽度/mm	高压绕组	153
	中压绕组	126.5
	低压绕组	28
铁芯质量/t		209.94
绕组铜重/t		44.17

低频变压器铁芯采用中国宝武武钢集团生产的 27/090 硅钢片，饱和磁密 1.93 T，20 Hz 下工作

磁密在 1.84 T 时的单位铁损为 0.343 W/kg。假设设计磁密选择在 1.84 T，按式(1)—(7)计算得铁芯对油温升为 39.854 ℃，油平均温升一般取 40 ℃，故铁芯对油温升为(39.854+40) ℃=79.854 ℃，小于标准 80 ℃，故铁芯中可不设置油道。

采用多目标遗传算法进行寻优，初始种群和每代个体数量均为 500，最大迭代次数 200，交叉概率 0.8，经过优化处理得出的结果如图 9 所示，其中标示为红色的区域形成了 Pareto 前沿。从中挑选出最优的优化点，作为低频变压器优化的最终结论。随后，结合实际工程经验，对所选的优化变量进行了的调整和校准，形成最终的优化方案。优化变量结果如表 3 所示。

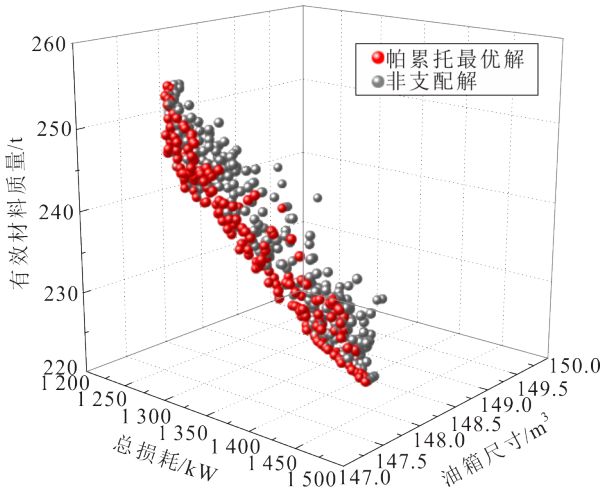


图 9 20 Hz 变压器优化结果

Fig.9 Optimization results of 20 Hz transformer

表 3 优化变量结果

Table 3 Results of optimizing variables

优化变量		数值
铁芯设计磁密/T		1.804
电流密度/(A·mm^{-2})	高压绕组	4.3
	中压绕组	4.22
	低压绕组	0.9
导线高度/mm	高压绕组	6.7
	中压绕组	7.5
	低压绕组	6
匝间油道/mm		3.5

通过优化变量，可以得到变压器铁芯尺寸、绕组尺寸和变压器质量等参数与变压器损耗。优化后的变压器各项如表 4、5、6 所示。

根据调研及征询结果，国内几大变压器生产制造厂家的工频 330 MVA/220 kV 变压器尺寸、质量设计典型估算值如表 7 所示。

表 4 优化后低频变压器铁芯、绕组结构参数

Table 4 Optimized structural parameters of iron core and winding of low-frequency transformer

参数		数值
铁芯直径/mm		1 420
铁芯截面积/cm^2		14 914.235
铁芯窗高/mm		2070
芯柱中心距/mm		2 375
旁柱中心距/mm		1 587
绕组高度/mm		1 710
辐向宽度/mm	高压绕组	114.5
	中压绕组	112
	低压绕组	9.5
铁芯质量/t		194.88
绕组铜重/t		33.39

表 5 优化后低频变压器损耗

Table 5 Losses of the optimized low-frequency transformer

变压器损耗	数值
负载损耗/kW	1 449.69
空载损耗/kW	63.77
总损耗/kW	1 513.46

表 6 优化后低频变压器外形尺寸与质量

Table 6 Dimensions and weight of the optimized low-frequency transformer

参数	油箱尺寸(长×宽×高)/mm	总质量/t	油质量/t
设计值	10 200×3 300×4 400	385	79

表 7 工频 220 kV 变压器尺寸、质量设计典型估算值

Table 7 Typical estimated values for the size and weight design of power frequency 220 kV transformers

参数	油箱尺寸(长×宽×高)/mm	总质量/t	油质量/t
A 厂	9 000×3 180×4 450	260	50
B 厂	8 100×2 760×4 478	280	55
C 厂	8 300×3 300×4 600	304	58
最小值	8 100×2 760×4 478	260	50
平均值	8 467×3 080×4 510	282	55

与同型号工频变压器对比，优化过后的低频变压器油箱尺寸是工频变压器油箱最小尺寸的 1.48 倍，是工频变压器油箱平均尺寸的 1.26 倍；低频变压器总重是工频变压器最小总重的 1.48 倍，是工频变压器平均总重的 1.37 倍。

某低频输电工程所用 330 MVA/220 kV 低频变压器质量、尺寸和损耗参数如表 8 所示。

与实际工程所用同型号低频变压器(后文称为变压器 A)对比，优化过后的低频变压器(后文称为

变压器 B)油箱尺寸缩减了 12.05%，总质量减轻了 12.70%，总损耗增加了 24.83%，总损耗的增加是采用高温绝缘系统提高绕组线圈中的电流密度而带来的必然结果，但产品的质量和尺寸得以缩减。

表 8　实际工程用低频变压器参数表

Table 8　Parameters of low frequency transformer for actual project

参数	总质量/t	油箱尺寸(长×宽×高)/mm	总损耗/kW
数值	441	10 100×3 730×4 470	1 212.464

3.2　绕组短路应力分析

绕组中的短路轴向应力和辐向应力应分别满足：

$$F_{\mathrm{i}} \le 0.9R_{\mathrm{P0.2}} \tag{20}$$

$$\sigma_{\mathrm{i}} \le 0.6R_{\mathrm{P0.2}} \tag{21}$$

式中：F_{i} 和 σ_{i} 分别为短路轴向和轴向应力；$R_{\mathrm{P0.2}}$ 为规定非比例延伸强度。

当发生短路故障时，轴向机械力和轴向机械力分别按式(23)和式(24)计算：

$$F_{\mathrm{i}} = \frac{8.04k_{\mathrm{y}}K_{\mathrm{I}}^2}{\lambda 10^{11}}\rho_{\mathrm{n}}R_{\mathrm{cp}}I_{\mathrm{N}}^2W_{\mathrm{N}}^2\alpha_{\mathrm{m}} \tag{22}$$

$$\sigma_{\mathrm{i}} = \frac{12.8k_{\mathrm{y}}^2K_{\mathrm{I}}^2I^2WR_{\mathrm{cp}}\rho_{\mathrm{n}}}{mnH_{\mathrm{K}}A_{\mathrm{l}}\times 10^8}\cdot N' \tag{23}$$

式中：k_{y} 为冲击短路电流系数，取 1.7~1.8；K_{I} 为短路电流稳定值倍数，经计算得 5.814；λ 为漏磁总宽度，cm；ρ_{n} 为洛氏系数，取 0.05~0.1；I_{N} 为额定相电流，A；W_{N} 为每相额定匝数；R_{CP} 为线圈辐向平均半径，cm；α_{m} 为漏磁组总安匝百分比，取 0.84；m 为每相并联支路数；n 为线饼中并联导线根数；H_{K} 为线圈的电抗高度，cm；A_1 为单根导线的截面积，cm^2；N' 取 0.6~0.95。

经计算，高压绕组短路轴向机械力约为 202 MPa，辐向机械力约为 183.2 MPa；中压绕组短路轴向机械力约为 220 MPa，辐向机械力约为 149.6 MPa。半硬铜自粘换位导线 C_3 的 $R_{\mathrm{P0.2}}$ 为 220~260 MPa，可满足绕组短路轴向应力要求。

3.3　温度场与电场仿真分析

利用有限元软件对变压器 B 进行电场与温度场仿真分析，检验低频变压器设计方法的可靠性。进行温度场仿真时[25]，采用二维轴对称场进行仿真计算。采用 4 组 YF4-400 冷却器，为降低仿真和工程分析的复杂度，基于对称性、等效热参数及工程经验进行合理简化。合成酯油参数特性与拟合参考文献[26]。为避免产生油流带电现象，绕组中油流速控制在 0.5 m/s[22]。仿真结构与结果如图 10 所示，仿真结果是变压器温度场低频稳态仿真结果。根据图 10 可知，随着高度的提升，绕组的温度也逐渐上升，且温度在绕组的顶部区域达到峰值。绕组热点温度为 97.7 ℃，仿真环境为 20 ℃，因此绕组热点温升为 77.7 K，满足温升限值要求。

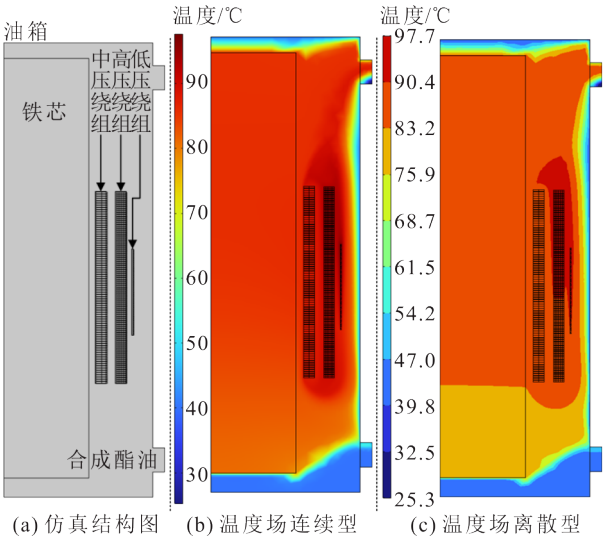


图 10　变压器 B 温度场仿真结构图与温度场整体分布图

Fig.10　Simulation structure diagram of transformer B and overall distribution diagram of temperature field

进行电场仿真时，也建立二维仿真模型。合成酯相对介电常数取 3.2，绝缘纸和绝缘纸板的相对介电常数分别取 3.1 和 4.4。静电环和低压绕组顶部为高电位；铁芯、各绕组底部为地电位。电场仿真结构和结果见图 11。对于酯类油器身绝缘设计许应击穿场强为 10.5 kV/mm，绝缘安全裕度须≥1.4[20]，即酯类油绝缘的实际工作场强应≤7.5 kV/mm。由图 11 可知，静电环表面油隙和低压绕组顶部的场强较高，最大场强约为 7.11×10^6 V/m，即 7.11 kV/mm，满足酯类油变压器绝缘设计要求。

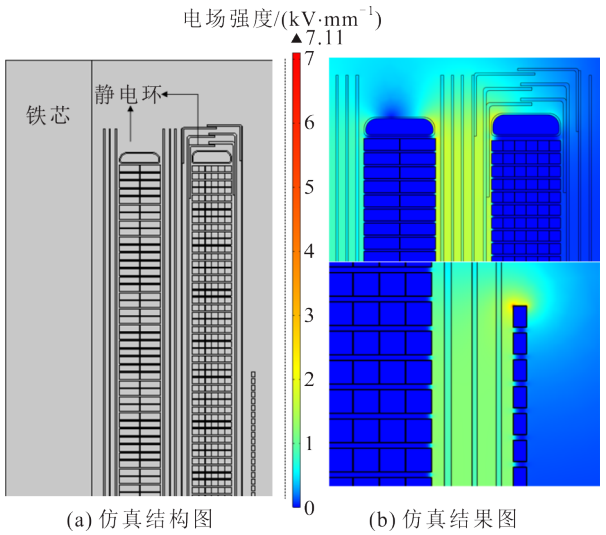
3.4　全生命周期经济性评估

海上风电项目设备的设计寿命一般为20~30 年[27]。本文采用全生命周期成本(LCC)模型[28]，覆盖设备全寿命周期(30 年)的初始投资、运行维护及报废成本：

$$C_{\mathrm{LCC}} = C_{\mathrm{cap}} + C_{\mathrm{main}} + C_{\mathrm{disposal}} \tag{24}$$

式中：C_{LCC} 是全生命周期成本，万元；C_{cap} 是初始投资成本，万元；C_{main} 是维护成本，万元；C_{disposal} 是报废回收价值，万元。

初始投资成本 C_{cap} 计算：



(a) 仿真结构图 (b) 仿真结果图

图 11 变压器 B 电场仿真结构图与电场分布图

Fig.11 Diagrams of electric field simulation structure and electric field distribution of transformer B

$$C_{\text{cap}} = C_{\text{Fe}} + C_{\text{Cu}} + C_{\text{oil}} + C_{\text{cooler}} + C_{\text{transport}} \tag{25}$$

式中：C_{Fe}为铁芯材料成本；C_{Cu}为绕组铜材成本；C_{oil}为绝缘系统成本；C_{cooler}为冷却系统成本；$C_{\text{transport}}$为运输安装成本。

维护成本 C_{main} 计算：

$$C_{\text{main}} = n(C_{\text{oil}} + C_{\text{handle}}) + n_{\text{y}}C_{\text{m}} \tag{26}$$

式中：n 为变压器油更换次数；C_{handle}为变压器油更换成本；n_{y}为变压器使用年限(30 年)；C_{m}为每年常规维护成本。矿物油的更换周期通常在 5~10 年之间，高温、潮湿或污染严重的环境会加速油品的老化，进而影响更换周期。合成酯油的耐湿性和抗氧化性更强，可延长变压器油的换油周期、降低运行维护成本。

报废回收价值计算：

$$C_{\text{disposal}} = G_{\text{Fe}}R_{\text{Fe}} + G_{\text{Cu}}R_{\text{Cu}} \tag{27}$$

式中，R_{Fe}和 R_{Cu}分别为硅钢片和绕组铜材的回收价格，万元/t。经计算，全生命周期成本 LCC 对比如图 12 所示。

因合成酯的成本高于矿物油的成本，导致采用高温绝缘系统的变压器 B 初始投资成本提高 27.49%；但矿物油的更换周期短，导致变压器 A 的维护成本(30 年内至少更换 4 次油)远超变压器 B，从全生命周期成本来看，变压器 A 的全生命周期成本要比变压器 B 的全生命周期成本高 7.36%。从长期运行角度，考虑海上升压站高环保标准和维护保养上的难度，选择使用合成酯作为绝缘介质不仅维持了良好的绝缘和防火能力，还有助于减少对环境的污染和维护成本。两大国产润滑油品牌——“长城”和“昆仑”均已开展了国产合成酯型变压器油的研制推广工作[29]，应用国产合成酯会大大缩减初始投资和维护的成本。

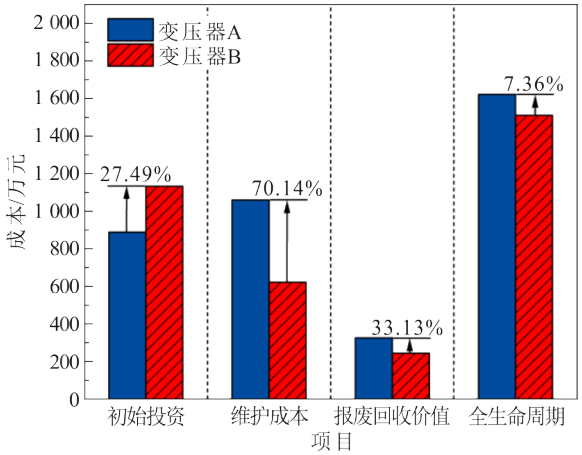


图 12 成本对比图

Fig.12 Cost comparison chart

4 结论

1）通过试验分析合成酯及合成酯油纸绝缘系统在 20 Hz 低频下的击穿特性，发现合成酯在低频工况下击穿电压提升 12.68%，但需保留足够绝缘裕度以应对其分散性较大的风险，而油纸系统击穿电压受频率影响较小，为优化设计奠定了基础。

2）在此基础上，提出基于高温绝缘系统的低频变压器轻量化设计方法，通过多目标遗传算法优化铁芯磁密、绕组电流密度及油道尺寸，使 330 MVA/220 kV 低频变压器总质量降低 12.7%、油箱尺寸缩减 12.05%，可有效控制低频变压器的质量与体积，使其不超过同型号工频变压器的 1.5 倍，且绕组热点温升和变压器绝缘强度均满足设计要求，验证了高温绝缘系统在低频变压器轻量化与小型化方面的有效性。

3）进一步经济性分析表明，合成酯的长期稳定性使全生命周期成本降低 7.36%，尤其适用于高盐高湿的海上环境。

参考文献 References

[1] 陆振纲，谢立军，赵国亮，等. 海上风电柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3708-3718.
LU Zhengang, XIE Lijun, ZHAO Guoliang, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3708-3718.

[2] 李晓华，刘轶，赵文彬，等. 基于流固耦合模型的柔性低频输电变压器振动特性[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5318-5326.
LI Xiaohua, LIU Yi, ZHAO Wenbin, et al. Vibration characteristics of flexible low-frequency power transformers based on the fluid-solid coupling model[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5318-5326.

[3] 张蕾，许挺. 世界首个柔性低频输电工程正式落点浙江杭州[J]. 新能源科技，2021(6)：11.
ZHANG Lei, XU Ting. The world's first flexible low-frequency transmission project officially landed in Hangzhou, Zhejiang[J]. New Energy Science and Technology, 2021(6): 11.

[4] 梅俊明，许多. 全国首个柔性低频输电示范工程完成海缆海上段敷设[N]. 国家电网报，2022-05-16(2).
MEI Junming, XU Duo. The first flexible low-frequency power transmission demonstration project in China has completed the marine cable laying section at sea[N]. State Grid News, 2022-05-16(2).

[5] WYLLIE P B, TANG Y, RAN L, et al. Low frequency AC transmission-elements of a design for wind farm connection[C]//Proceedings of the 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, USA: IET, 2015: 1-5.

[6] 汪大洋，刘宗烨，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.

[7] 阳熹，汤翔，李炬添，等. 海上风电低频主变压器特性分析及技术展望[J]. 南方能源建设，2023，10(5)：139-148.
YANG Xi, TANG Xiang, LI Jutian, et al. Characteristics analysis and technical prospect of low-frequency main transformer for offshore wind power[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 139-148.

[8] 海理. 基于遗传算法的工业直流变压器电磁参数优化设计[D]. 衡阳：南华大学，2020.
HAI Li. Optimization design of electromagnetic parameters of industrial DC transformer based on genetic algorithm[D]. Hengyang, China: University of South China, 2020.

[9] 樊叔维，汪洁，鱼振民，等. 遗传算法在电力变压器和电机全局优化设计中的应用研究[J]. 西安交通大学学报，1996，30(6)：15-21.
FAN Shuwei, WANG Jie, YU Zhenmin, et al. Genetic algorithm and its application in power transformer and electrical machine global optimization design[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(6): 15-21.

[10] 杨新生，张云鹏，徐桂芝，等. 基于 T-ψ 有限元法的多目标函数变压器优化设计[J]. 电工技术学报，2021，36(增刊 1)：75-83.
YANG Xinsheng, ZHANG Yunpeng, XU Guizhi, et al. Multi-objective optimization design of transformer base on T- ψ finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement1): 75-83.

[11] 刘道生，魏博凯，蔡昌万，等. 基于混沌自适应遗传算法的非晶合金干式变压器优化设计[J]. 高压电器，2022，58(10)：40-47.
LIU Daosheng, WEI Bokai, CAI Changwan, et al. Optimization design of amorphous alloy metal dry-type transformer based on chaotic adaptive genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 40-47.

[12] 张力菠，吴一锴，王群伟. 考虑碳中和目标与成本优化的可再生能源大规模发展规划[J]. 广东电力，2023，36(7)：31-39.
ZHANG Libo, WU Yikai, WANG Qunwei, et al. Large-scale development of renewable energy in consideration of carbon neutrality and cost optimization[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 31-39.

[13] 刘黎，尹聪聪，詹江杨，等. 35 kV 低频变压器的轻量化设计方法[J]. 浙江电力，2024，43(4)：129-136.
LIU Li, YIN Congcong, ZHAN Jiangyang, et al. A lightweight design method for a 35 kV low-frequency transformer[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 129-136.

[14] 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.

[15] 尹克宁. 采用高温绝缘材料的液浸式变压器[J]. 电力设备，2004，5(5)：19-23.
YIN Kening. Liquid Immersed transformer with high temperature insulating material[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(5): 19-23.

[16] LIM T. 采用高温绝缘减少变压器关键材料[J]. 变压器，2013，50(5)：57-61.
LIM T. Using high temperature insulation to reduce the key materials of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(5): 57-61.

[17] 韩金华，韩筛根，王思宝，等. 一种基于高燃点植物绝缘油变压器设计方法[J]. 变压器，2014，51(8)：38-42.
HAN Jinhua, HAN Shaigen, WANG Sibao, et al, Transformer design method based on high ignition point vegetable insulation oil[J]. Transformer, 2014, 51(8): 38-42.

[18] 钱广远. 瘦身型高燃点油浸式变压器在海上风电机组中的应用[J]. 上海电气技术，2019，12(2)：16-18，22.
QIAN Guangyuan. Application of slimming-type high ignition-point oil-immersed transformer in offshore wind turbines[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2019, 12(2): 16-18, 22.

[19] 叶少明，曹俊威. 高燃点环保绝缘油变压器技术研究[J]. 电气时代，2020(10)：63-66.
YE Shaoming, CAO Junwei. Research on the technology of environmental protection insulating oil transformer with high ignition point[J]. Electric Age, 2020(10): 63-66.

[20] 杨建军，杨国泰，蔡胜伟，等. 海上升压站用 220 kV 酯油变压器选型与优化设计研究[J]. 绝缘材料，2024，57(5)：66-72.
YANG Jianjun, YANG Guotai, CAI Shengwei, et al. Selection and optimization design of 220 kV ester oil transformer for offshore substation[J]. Insulating Materials, 2024, 57(5): 66-72.

[21] 龙葵，李秋惠，周潮，等. 浅谈天然酯绝缘油配变不同绝缘系统应用[J]. 变压器，2021，58(4)：47-50.
LONG Kui, LI Qiuhui, ZHOU Chao, et al. Distribution transformer with application of different insulation systems in natural ester insulating oil[J]. Transformer, 2021, 58(4): 47-50.

[22] 彭广勇，刘东升，刘力强. ODAF 冷却方式的变压器温升计算与分析[J]. 变压器，2020，57(4)：1-5.
PENG Guangyong, LIU Dongsheng, LIU Liqiang. Calculation and analysis of temperature rise of transformer with ODAF cooling mode[J]. Transformer, 2020, 57(4): 1-5.

[23] 张维凯，孙　强，葛延鹏，等. 基于 NSGA-Ⅱ算法的 GIS 隔离开关盆式绝缘子电场分布和机械性能综合优化[J]. 高电压技术，2025，51(1)：336-345.
ZHANG Weikai, SUN Qiang, GE Yanpeng, et al. Integrated optimization of electrical field distribution and mechanical performance of basin-type insulator in GIS disconnector based on NSGA-Ⅱ[J]. High

Voltage Engineering, 2025, 51(1): 336-345.

[24] 国家能源局. 220 kV~750 kV 油浸式电力变压器使用技术条件：DL/T 272—2012[S]. 北京：中国电力出版社，2012.
National Energy Administration. Technical specification of 220 kV~750 kV oil immersed power transformer: DL/T 272—2012[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2012.

[25] 李志刚. 220 kV 变压器绕组热点温升仿真分析与产品验证[J]. 中国新技术新产品，2022(7)：31-33.
LI Zhigang. Simulation analysis and product verification of 220kV transformer winding hot spot temperature rise[J]. New Technology & New Products of China, 2022(7): 31-33.

[26] 严夏，许志浩，康兵，等. 基于多场耦合的合成酯油变压器温变行为研究[J]. 变压器，2024，61(5)：24-29.
YAN Xia, XU Zhihao, KANG Bing, et al. Research of temperature change behavior of synthetic ester oil transformer based on multi-field coupling[J]. Transformer, 2024, 61(5): 24-29.

[27] RUBERT T, MCMILLAN D, NIEWCZAS P. A decision support tool to assist with lifetime extension of wind turbines[J]. Renewable Energy, 2018, 120: 423-433.

[28] 丰力，张莲梅，韦家佳，等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J]. 中国电力，2024，57(9)：80-93.
FENG Li, ZHANG Lianmei, WEI Jiajia, et al. Development & thinking of offshore wind power based on life cycle economic evaluation[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 80-93.

[29] 迟红锋. 合成酯型变压器油市场分析及展望[J]. 石油商技，2021，39(6)：4-7.
CHI Hongfeng. Market analysis and prospect of synthetic ester transformer oil[J]. Petroleum Products Application Research, 2021, 39(6): 4-7.



李　昊
1997—，男，硕士
主要从事低频电力变压器优化与设计
E-mail: 814287303@qq.com

LI Hao



赵文彬(通信作者)
1977—，男，博士，高工
主要从事气体放电及等离子体、电气设备状态管理等方面的研究工作
E-mail: wenbinmax@163.com

ZHAO Wenbin
Ph.D.
Senior engineer
Corresponding author



王　亚
1988－，女，博士，硕导
主要研究方向为聚乙烯空间电荷、绝缘老化和外绝缘
E-mail: 1040986374@qq.com

WANG Ya
Ph.D.

收稿日期　2025-04-07　在线出版日期　2025-08-28　　编辑　曹昭君