第 50 卷 第 12 期：5301-5309 高电压技术 Vol.50, No.12: 5301-5309
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240686

新型无环流空心电抗器电磁结构设计方法及工程应用

张明泽[1]，王炳杰[1]，张 健[2]，刘 骥[1]，李 爽[3]，朱东柏[1]
（1. 哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室，哈尔滨 150080；2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院，哈尔滨 150030；3. 国网内蒙古东部电力有限公司通辽供电公司，通辽 028000）

摘 要：空心电抗器作为电网中抑制过电压、滤波、无功补偿的重要电力设备，苛刻的运行环境对电抗器长期稳定运行有更高的要求。由于传统的电抗器设计方式及制造工艺差异，使得部分设计的电抗器包封间出现环流现象，需增加外部调匝线圈，因而使得电抗器出现了外加薄弱点，并增加了高寒地区大温差工作环境下包封绝缘出现开裂的风险。为了从根本上解决包封间环流及绝缘开裂这一技术难题，从电抗器电磁结构优化的角度出发，将小圆线并绕结构的常规视角转变至单组合导线串绕的结构方式上，构建了全新的电抗器电感值计算非线性方程组，并采用等温升约束条件及多端起头方式，实现了空间结构对称的无环流电抗器电磁结构的设计。最终通过等长绕线、强化匝间绝缘、减小包封绝缘厚度的设计思想，实现了首套无环流电抗器的电磁结构设计。设计完成的首套 10 kV 串联空心电抗器通过了型式及特殊试验，并在我国东北地区冬季成功挂网运行，相比与传统电抗器，新型无环流电抗器体积减小了 40%、温升降低了 32%，该文提出的新型无环流电抗器的设计方法将为中国空心电抗器高端制造提供了新的设计形式，这对于保障高寒地区空心电抗器的长期运行可靠性具有重要意义。

关键词：空心电抗器；环流现象；电磁结构设计；局部过热；包封绝缘开裂

Design Method and Engineering Application of Electromagnetic Structure for Novel Non-circulating Air-core Reactor

ZHANG Mingze[1], WANG Bingjie[1], ZHANG Jian[2], LIU Ji[1], LI Shuang[3], ZHU Dongbai[1]
(1. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150030, China; 3. Tongliao Power Supply Company, State Grid Inner Mongolia East Electric Power Company Limited, Tongliao 028000, China)

Abstract: As an important power device for suppressing overvoltage, filtering, and reactive power compensation in power grids, the air-core reactor faces higher requirements for its long-term stable performance in stringent operational environments. Due to the differences in traditional reactor design methods and manufacturing processes, some designed reactors may experience circulating currents between their encapsulation. It is necessary to add external regulating winding coils,which will result in additional weak points in the reactor, and will increase the cracking risk of encapsulation insulation in high-cold regions and large-temperature-difference operating environments. To fundamentally solve the technical challenges of circulating currents in encapsulation and insulation cracking, this paper starts from optimizing the electromagnetic structure of reactors. The conventional perspective of winding small circular wires in parallel was transitioned to the structural approach of single combination wire winding in series. The new nonlinear equation system for calculating the inductance value of reactors was constructed. Under isothermal constraint conditions and by using a multi-terminal lead configuration, the design of a spatially symmetric electromagnetic structure for a non-circulating current reactor was achieved. Finally, the electromagnetic structure design of the first set of non-circulating current reactors was achieved through an equally long winding line, strengthening inter-turn insulation, and weakening encapsulated insulation. The first designed 10 kV series air-core reactor has passed type and special tests and successfully been put into operation on the grid in winter in Northeast China. Compared with traditional reactors, the novel non-circulating current reactor has a 40% smaller volume and a 32% lower temperature-rise. The design method of a novel non-circulating current reactor in this

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5108-202218280A-2-338-XG)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5108-202218280A-2-338-XG).

paper will provide a new design form for the high-end manufacturing of air-core reactors in China, which is of great significance for ensuring the long-term reliability of air-core reactors in high-cold regions.

Key words: air-core reactor; circulating current phenomenon; electromagnetic structure design; local overheating; encapsulation insulation cracking

0 引言

干式空心电抗器广泛应用于高压和超特高压变电站，在过电压抑制、滤波、无功补偿等环节发挥重要作用[1]。干式空心电抗器技术引入国内已 30 余年，现有技术采用多包封、多层支路并联结构，在中高压和特高压电网中得到广泛应用[2]。然而多年的运行故障分析表明，传统的空心电抗器结构暴露出越来越多的绕组结构、导线绝缘、包封绝缘、制造工艺等方面的不足和缺点[3-5]，设计方式存在温升和分数匝误差大等问题，使得电抗器电磁结构设计不合理(绕制时需多种线规，且环流产生时需要外部调匝)；同时对于高寒地区大温差环境下长期户外运行的空心电抗器，易出现包封局部过热后绝缘开裂现象，水分侵入后将促使匝间绝缘劣化，严重时引起电抗器匝间短路，烧毁电抗器[6-7]。

目前，对于大温差下包封绝缘开裂问题，电抗器厂家的设计人员普遍认为需加强包封绝缘厚度，提高制造工艺，以降低电抗器包封开裂的可能性，从而提高电抗器的长期运行稳定性[7-8]。但该方式存在明显的弊端，如在制造时加强包封绝缘厚度虽然增加了包封绝缘强度，但包封的散热特性将显著降低。为保证电抗器温升不超过 70 K，必将增加电抗器各包封的散热面积，即增加电抗器的体积，但在电抗器体积增大后包封内部线圈与包封绝缘间的张力也将增大，且金属材料与绝缘材料的热膨胀系数不同[9]，长期运行后必然出现金属与绝缘材料脱粘问题，使得电抗器包封内部出现大量空腔，包封内积水的可能性大大增加。因此，单一考虑增加包封绝缘厚度，改善抗器高端部位置的制造工艺，均无法有效解决上述问题[10]。

现阶段部分高校及研究院均采用有限元计算方式对电抗器结构进行仿真分析，通过磁场分布、电场分布、温度场分布的计算，给出了部分关于各层线圈数目、气道宽度设定的合理化建议[11-15]。但对于有限元仿真分析，更多的是针对已有的电抗器结构参数进行建模，且为了简化计算，大多不考虑电抗器上下星架臂对磁场分布的影响[16-18]，使得电抗器总体损耗仿真计算结果极为理想；同时，对于 35 kV 及更高电压等级的电抗器，由于电抗器体积较大、包封数、线匝数均较多，采用有限元仿真建模计算时的难度极大，仿真计算时极易造成计算过程中的不收敛问题，因此有限元仿真计算方法更多地适用于对已有结构参数电抗器电、磁、热特性的定性分析，其无法实现空心电抗器结构的实际设计工作。

干式空心电抗器的设计要综合考虑电感、电流密度、温升、损耗等多方面的要求，以此确定其结构参数。目前，国内针对干式电抗器电磁结构设计最可靠且大规模投入生产的方式仍为数值解析计算的方法。朱东柏教授在基于螺线管电感的计算方法上，考虑了各相线圈空间上磁场的影响，首次提出了等电流密度法、等电阻电压法(阻性压降模相等法)、等温升法、不等电流密度法[19]4 种电抗器电磁结构设计方法，通过多匝线圈电磁特性非线性方程组的求解，可准确获得某一电压等级、容量下电抗器所需的结构参数[20]。但在传统设计方式下(多匝并联设计)，对于大体积、大容量的空心电抗器，各包封内各层绕线不等高、各包封中的线规不同、轴向排紧系数不同，使得厂家参照计算单绕制的空心电抗器结构无法与设计值完全一致，且采用等温升设计时，依据散热气道利用系数计算的电流值无法满足实际各包封等温升的要求，且易在空心电抗包封间出现设计电流与实际电流不等的问题即“环流”表象。现有的解决该问题的方式为外部增加调匝线圈，降低某个包封中“环流”的影响，但外加调匝线圈将造成电抗器生产制造工序增加，且额外增加了绝缘的风险点 ，使得电抗器长期运行可靠性降低，因此空心电抗器应尽量不增加调匝部分，目前传统电抗器电磁结构无法完全做到包封间无环流[21-22]，亟待提出一种全新的干式空心电抗器电磁结构设计方法解决该问题。

基于此，为消除传统电抗器自身结构设计缺陷引起的环流及包封开裂问题，本文提出了空间结构对称的无环流电抗器的电磁结构设计方法，通过单线规等长绕线方式，并强化匝间绝缘，减小包封绝

缘的设计思想，实现了业内首套额定电压为 10 kV 的无环流干式空心电抗器的设计及制造，并在我国高寒地区冬季挂网运行，相比于传统电抗器，新型干式空心电抗器的体积减小了 40%、温升降低了 32%、制造成本可降低 15%，且使得在高寒地区大梯度环境温度范围内包封绝缘开裂的可能性将大大降低，提高了户外空心电抗器的长期运行可靠性。

1　无环流空心电抗器设计基本理论

1.1　电感值计算

空心电抗器设计时，其电感值 L_n 有两种方式确定，对于并联电抗器，需根据电压等级以及需要补偿的额定容量进行计算，如式(1)：

$$L_n=\frac{\left(U_n/\sqrt{3}\right)}{S_n\omega} \tag{1}$$

式中：U_n 为额定电压，V；S_n 为额定容量；ω 为角频率，rad/s。

对于串联电抗器，其主要为了限制补偿电容器组的合闸涌流，电感值需根据其串联的电容器组额定电流及需补偿的电抗率计算，如式(2)：

$$L_n=\frac{U_L U_C/\sqrt{3}}{100I_n\omega} \tag{2}$$

式中：U_C 为电容器组的额定电压，V；U_L 为补充的电抗率，%；I_n 为电容器组的额定电流，即串联电抗器的额定电流，A。

传统电抗器电感值设计时采用的是多匝线圈并联结构，各并联支路首尾电压相同，均为额定电压 U_n，各支路电阻分别为 R_1、R_2、…、R_m，各支路电感分别为 L_1、L_2、…、L_m，各支路电流分别为 I_1、I_2、…、I_m，m 为等效包封支路数量，如图 1 所示。图中，M_{ij} 为各包封间的互感、自感值，i=1, 2, …, m，j=1, 2, …, m，当 i=j 时为自感值，i≠j 时为互感值。

由于互感及自感的不同使得各匝线圈中的电流值不同，在不考虑电阻时，可如式(3)对其电路进行计算。

$$\begin{cases}
\mathrm{j}\omega M_{11}\boldsymbol{I}_1+\mathrm{j}\omega M_{12}\boldsymbol{I}_2+\mathrm{j}\omega M_{13}\boldsymbol{I}_3+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{1m}\boldsymbol{I}_m=\boldsymbol{U}_n\\
\mathrm{j}\omega M_{21}\boldsymbol{I}_1+\mathrm{j}\omega M_{22}\boldsymbol{I}_2+\mathrm{j}\omega M_{23}\boldsymbol{I}_3+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{2m}\boldsymbol{I}_m=\boldsymbol{U}_n\\
\mathrm{j}\omega M_{31}\boldsymbol{I}_1+\mathrm{j}\omega M_{32}\boldsymbol{I}_2+\mathrm{j}\omega M_{33}\boldsymbol{I}_3+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{3m}\boldsymbol{I}_m=\boldsymbol{U}_n\\
\quad\cdots\qquad\cdots\qquad\cdots\qquad\cdots\\
\mathrm{j}\omega M_{m1}\boldsymbol{I}_1+\mathrm{j}\omega M_{m2}\boldsymbol{I}_2+\mathrm{j}\omega M_{m3}\boldsymbol{I}_3+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{mm}\boldsymbol{I}_m=\boldsymbol{U}_n\\
\\
I_1+I_2+I_3+\cdots+I_m=I_n
\end{cases} \tag{3}$$

采用传统设计方式制造的空心电抗器，工艺差异及设计时限定约束条件无法实际满足，使得空心电抗器包封间产生环流的问题。本文采用各包封中的绕线为串联绕制结构，采用矩形组合导线减小绕线时所需线规数，使得在工艺及设计上实现无环流设计。串联设计各段电抗器结构的端电压 U_1—U_m 总和为额定电压值 U_n，绕线方式如图 2 所示。

基于此设计时采用串联设计的方式，其电抗器等效互感系数及等效匝数的理论计算表达式如下：

$$\begin{cases}
\mathrm{j}\omega M_{11}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{12}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{13}\boldsymbol{I}_n+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{1m}\boldsymbol{I}_n=\boldsymbol{U}_1\\
\mathrm{j}\omega M_{21}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{22}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{23}\boldsymbol{I}_n+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{2m}\boldsymbol{I}_n=\boldsymbol{U}_2\\
\mathrm{j}\omega M_{31}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{32}\boldsymbol{I}_n+\mathrm{j}\omega M_{33}\boldsymbol{I}_n+\cdots+\mathrm{j}\omega M_{3m}\boldsymbol{I}_n=\boldsymbol{U}_3\\
\quad\cdots\qquad\cdots\qquad\cdots\qquad\cdots\\
j\omega M_{m1}\boldsymbol{I}_n+j\omega M_{m2}\boldsymbol{I}_n+j\omega M_{m3}\boldsymbol{I}_n+\cdots+j\omega M_{mm}\boldsymbol{I}_n=\boldsymbol{U}_m\\
\\
U_1+U_2+U_3+\cdots+U_m=U_n
\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}
f_e=\dfrac{\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{m}f_{ij}}{m^2}\\
n_e=\sqrt{\dfrac{L_n}{f_e}}
\end{cases} \tag{5}$$

式中：M_{ij} 单位为 H；I_n 单位为 A；U_i 为各包封分担的电压值，i=1, 2, …, m，V；f_{ij} 为各包封间的互感、自感系数，根据互感、自感系数与各包封内的等效匝数即可确定各包封间的互感、自感值；f_e 为将多包封电抗器等效为单包封电抗器后的自感系数；L_n 为设计电抗器电感值，H；n_e 为将多包封电抗器等效为单包封电抗器时的线圈匝数。

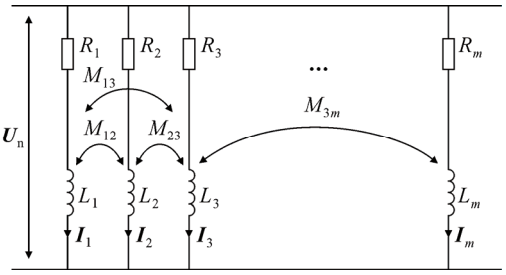


图 1　传统电抗器电路等效结构

Fig.1　Equivalent structure of traditional reactor circuit

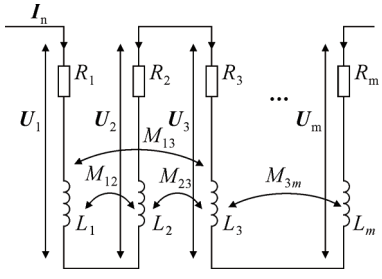


图 2　新型电抗器电路等效结构

Fig.2　Equivalent structure of a novel reactor circuit

考虑到新型串绕结构中最大的问题是绕线时，饼式线圈的起绕处上下两匝间承担的电压值为幅向匝数的 2 倍，因此设计时应减小幅向匝数，增加轴向匝数，以此降低雷电过电压下匝间可能承担的最大电压值。对于并联电抗器，由于包封数更多(幅向匝数多)，该问题影响更大，需进一步对上述方程组进行修正，并采用“少并多串”新结构消除过电压下匝间电压过大的影响，在后期并联空心电抗器设计的研究中将进行相关论述。

1.2 匝数计算

为减少绕线数，绕制新型电抗器时采用组合导线形式，根据串联等效电路的设计思路，在等效匝数计算时需考虑安匝平衡关系，即当电流一定时，各包封中匝数相同且之和为等效匝数。新型电抗器绕线时采用类饼式绕线结构形式，等效匝数可根据式(5)计算得到，初始设计时可根据所需设计电抗器的高度、内径、电流密度、初始线规、匝绝缘厚度等参数，计算初始的幅向及轴向匝数：

$$\begin{cases} H_{\mathrm{t}}=\mathrm{Floor}(H/(B+T_{\mathrm{u}})/1.06/N_{\mathrm{u}})\times N_{\mathrm{u}} \\ F_{\mathrm{t}}=(\mathrm{Floor}((n_{\mathrm{e}}/H_{\mathrm{t}})\times N_{\mathrm{c}})+1)/N_{\mathrm{c}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：H_{t}为电抗器的轴向匝数；F_{t}为电抗器的幅向匝数；H为电抗器的高度，mm；B为初始设定单根扁线的截面高度，mm；N_{u}为星架臂的分匝数，如 8 星架臂时分匝数 N_{u}为 1/8；N_{c}为单匝线中的扁线根数；T_{u}为匝间绝缘厚度，mm；Floor(*)为向下取整计算；式(6)中 1.06 为绕线时轴向方向的膨胀系数，幅向膨胀系数可考虑为 1.03，根据厂家绕线工艺的紧密程度制定，一般为 1.02~1.06。考虑到初始设定后的电流密度值，经过多次迭代计算，当特定参数(损耗、等效匝数、电感值)连续两次计算的相对误差小于 0.001 时，目标电感值与设计电感值间的绝对误差小于 0.1%，其远小于 JB/T 5346 2014《高压并联电容器用串联电抗器》、JB/T 10775—2007《6 kV-35 kV 级干式并联电抗器技术参数和要求》行业标准中电感值偏差的要求(串联电抗器电感值偏差为 0~+5%、并联电抗器电感值偏差为–5%~+5%)，以此获得的电抗器结构参数满足可得到电抗器的幅向、轴向匝数及所需的线规截面尺寸。

在部分电抗器的设计中，由于所需额定电流较大，在满足一定电流密度的前提下，计算后单根组合导线的尺寸较大，但对于实际电抗器生产时，截面尺寸较大的组合导线在立绕时受导线金属强度的影响使得绕制不易实现，因此在设计时可考虑多根组合导线同时绕组的方式，以降低各根组合导线中的电流密度(该方式类似于传统电抗器时的轴并绕制)。对于仅有 1 根组合导线时可采用饼式绕法逐层跨接包封，从而在各包封中无环流的产生。为减小组合导线尺寸，将多根组合导线在同位置起头绕制时必将出现线匝不等长的问题，而为保证各包封中的线匝等长、对称结构设计，需根据绕制时组合导线数目，在对称处同时起绕，并在包封间进行跨接工艺。考虑到散热问题时，如各包封气道宽度相同，各包封能的绕线匝数可设计为内外包封中匝数多，中间各包封中匝数相对少，如气道宽度不同，则各包封中匝数可相同。

1.3 组合导线的线规选择

根据上述计算获得的组合导线截面尺寸，结合 GB/T 3956—2008 中明确规定了非圆形/圆形绞合紧压导体不同截面积下需要使用单线的最少根数，可对组合导线进行定制。由于紧压圆形导体与非紧压圆形导体间有所区别，且厂家制作组合导线导体有效截面积可进行制定，考虑延伸系数与绞入系数后，组合导线的一般紧压系数为 0.83~0.9；对于串联电抗器与并联电抗器，进行组合导线的制作时也有一定差异。由于串联电抗器承担的匝间电压与其电抗率有关，匝间电压较低，因此组合导线由多根小圆线绞合压制，因此组合导线中导体的有效截面积可根据组合导线截面积与紧压系数的乘积获得。但对于并联电抗器，需考虑单根小圆线外包绕线绝缘，因此在相同组合导线截面积下，制作并联电抗器的组合导线导体有效截面积较小，其紧压系数减小，其可自行计算。在组合导线定制后需对导线进行退火处理，消除导线绞合时内部的残余应力，降低组合导线硬度，便于厂家电抗器的绕制。

1.4 等温升约束条件

电抗器各包封的温升主要根据包封中的损耗及有效散热面积决定，因此为了满足各包封等温升这一条件，消除电抗器局部包封的温升过高，而整体平均温升较低这一现象，需构建各包封内所需组合导线金属有效面积与包封宽度及散热系数的关系(由于各包封中匝数的轴向线规相同，仅需明确幅向线规尺寸即可)，并以此作为线规选取的边界条件。考虑包封表面散热系数、撑条遮挡系数、包封附加损耗系数，当各包封等温升时后可得：

$$\frac{k_{\mathrm{p}}\rho\pi D_i n_i I_i J}{\pi D_i H_i a_{i1} k_{i1}+\pi D_i H_i a_{i2} k_{i2}}=\frac{k_{\mathrm{p}}\rho\pi D_j n_j I_j J}{\pi D_j H_j a_{j1} k_{j1}+\pi D_j H_j a_{j2} k_{j2}} \tag{7}$$

$$\frac{n_i A_i}{a_{i1}k_{i1}+a_{i2}k_{i2}}=\frac{n_j A_j}{a_{j1}k_{j1}+a_{j2}k_{j2}} \tag{8}$$

$$\frac{A_i}{A_j}=\sqrt{\frac{a_{i1}k_{i1}+a_{i2}k_{i2}}{a_{j1}k_{j1}+a_{j2}k_{j2}}} \tag{9}$$

式中：k_p为包封的附加损耗系数，一般为1.2；ρ为100 ℃时铝电阻率，3.9×10^{-8} Ω·m；D_i、D_j分别为第i、j个包封的等效直径，m；H_i、H_j分别为第i、j个包封的高度，m；a_{i1}、a_{i2}与a_{j1}、a_{j2}分别为第i、j个包封内外表面的散热系数，最内最外表面无遮挡因此该值为1，中间散热系数与气道宽度，包封高度有关；k_{i1}、k_{i2}与k_{j1}、k_{j2}分别为第i、j个包封撑条的遮挡系数，最内最外表面无遮挡因此该值为1，中间处包封撑条遮挡系数为0.9；n_i、n_j分别为第i、j个包封的等效匝数，匝；A_i、A_j分别为第i、j个包封内轴向金属总宽度，mm。

根据得到电抗器的结构尺寸可计算各包封的温升θ_i及整体电抗器的平均温升θ，温升计算表达式为：

$$\theta_i=0.36\left(\frac{P_e(i)k_f^{\,2}}{\pi D_i H_i a_{i1}k_{i1}+\pi D_i H_i a_{i2}k_{i2}}\right)^{0.8},\ i=1,2,3,\cdots,n \tag{10}$$

$$\theta=0.36\left(\frac{P_e k_f^{\,2}}{\sum_{i=1}^{m}\left(\pi D_i H_i a_{i1}k_{i1}+\pi D_i H_i a_{i2}k_{i2}\right)}\right)^{0.8} \tag{11}$$

式中：P_e为电抗器的等效损耗，W；最内最外表面无遮挡因此a_{i1}、a_{i2}为1，中间散热系数与气道宽度，包封高度有关；最内最外表面无遮挡因此k_{i1}、k_{i2}为1，中间处包封撑条遮挡系数为0.9；k_f为考核温升时损耗的附加系数，对于串联电抗器考虑全部谐波损耗后其值为1.35，对于并联电抗器其需要以系统中的最高运行电压倍数进行计算，一般其值为1.1。

现阶段对于式(10)、式(11)中的前置系数0.36是以空气自冷式变压器线圈为模型，并考虑的两部分有效散热面积计算得到的。其中一部分是外露散热面，即与自然冷却空气相接触的表面，主要包括对流和辐射两种散热的共同作用，外露散热面完全有效；另一部分是内散热面，即与风道相接触的表面。相比于外散热面，线圈的内散热面不是完全有效的，主要原因有两个：1）在风道中的散热面，只有对流散热作用，无辐射散热作用。2）在风道中由磨擦所生的风阻对空气对流有一定的影响，该影响降低了对流散热的作用。因此，现阶段的电抗器设计中均采用该值，但考虑到新型电抗器包封厚度降低、内部温度较高的包封将与温度较低的包封进行热量交换，对比试验结果后该系数应减小，新型电抗器前置系数较小为0.3。

2　结构参数仿真分析

本文设计的新型电抗器电压等级为10 kV(串联电容器组的额定电压为7.4 kV)，额定电流270.27 A，电抗率为6%，额定容量为120 kVA，气道宽度为25 mm，电抗器的本体线圈高度为465 mm，包封数目为5，等效匝数为105。在确定了单饼线圈中的组合导线根数后，可计算获得满足等温升时，各包封内组合导线所需金属的轴向总宽度，因此可得到单饼线中在各包封中的线分数与组合导线数及幅向匝数有关。在仿真计算时以电抗器内机变化为300~800 mm进行设定，获得了其总损耗与电抗器等效匝数关系如图3所示、由图3可得，随着设计内径尺寸r增加，等效匝数与目标匝数均减小(不同内径下线规尺寸不同)，且在满足一定电感值时，半径增加，等效匝数将减少，但电抗器的总损耗成波动变化，其主要由等效半径与等效匝数共同影响损耗的变化共同决定，因此不能单一地认为匝数减少后损耗可有效降低，其等效半径增加将加大损耗；同时为使得组合导线中电流密度值一定，当匝数减少后在轴向高度一定的前提下，轴向线规的尺寸与幅向线规的尺寸均将发生变化，随着内径的增加，轴向线规尺寸增加而幅向线规的尺寸降低，但对于组合导线中有效金属的截面积不变。在电抗器内径增加后，有效散热面积增加使得电抗器整体的平均温升显著降低。

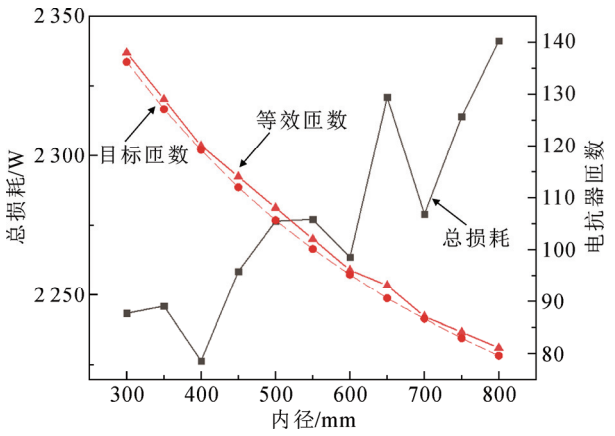


图3　电抗器内径与损耗及匝数的关系

Fig.3　Relationship between the inner diameter of a reactor and its losses and turns

在进行仿真计算时发现，如采用上述新型电抗器的设计方法，在单饼线圈中，为保证包封等温升的设计原则，必然使得内外两个包封中的组合导线数大于中间各包封(内外包封的散热系数不同)，而这与本文提出的电抗器串联模型等效互感系数及等效匝数计算的假定相互违背(设计理念中假定各包封中的组合导线数等分)，因此如内外包封中的组合导线数显著大于内部各包封，将造成设计电感值与目标电感值存在较大差异。本文对不同内径下以包封整体等效互感系数计算的电感值，与各包封中组合导线全部等效互感系数计算的电感值进行了比较，如图 4 所示，其中相对误差均以目标电感值进行计算，且各包封中组合导线全部等效互感系数进行电感值计算更符合实际。

根据图 4 中相对误差率变化规律可知，当根据目标电感值对电抗器结构设计，单饼线圈中内外包封中组合导线数大于内部包封时，设计电抗器的实际电感值将出现负偏差，这对于串联电抗器是不允许的(并联电抗器设计时可存在负偏差)。如在参考计算结果时仍以整体包封等效进行结构电感值计算，在设计半径较小的电抗器时将出现更明显的电感值偏差问题，即认为设计的电感值为正误差而实际电感值为负偏差，因此包封等温升设计约束与电感值偏差问题需协同考虑，可在设计时对目标电感值进行一定程度的增加，弱化负偏差的影响。

3 新型电抗器样机制作与工程应用

为验证本文提出的新型电抗器结构的准确性，对我国东北地区某 220 kV 变电站中的串联电抗器进行了设计，由于本次新型电抗器制作后需进行实际挂网长期带电运行，因此需对现挂网运行的传统空心电抗器 CKGKL-120/10-6 进行替换，其所需替换电抗器的额定容量、电抗率等运行参数如表 1 所示，其串联电容器组的额定电压为 7.4 kV、额定容量 6 000 kVA。

根据上述理论分析，新型无环流电抗器设计流程图如 5 所示。

基于此，本文对该运行参数下的电抗器结构进行了设计，新型电抗器各结构的设计参数见表 2。

根据本文设计方法，在设定所需高度及半径等初始参数后，可获得多组不同的电抗器的结构参数，表 2 中给出的结构参数为其中之一，设计时主要考虑需更换的电抗器体积，由于地基尺寸固定(三相电

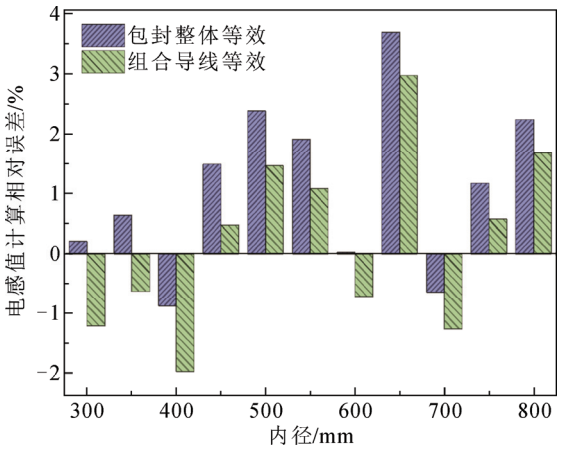


图 4 电感值相对计算误差关系

Fig.4 Relationship between relative calculation errors of inductance values

表 1 干式空心电抗器的运行参数

Table 1 Operating parameters of dry type air core reactor

参数	数值(型号)	参数	数值(型号)
额定电压/kV	10	额定电抗率/%	6
额定容量/kVA	120	实测电感值/mH	5.229
绝缘耐热等级	B	冷却方式	AN
额定电流/A	270.27	额定频率/Hz	50

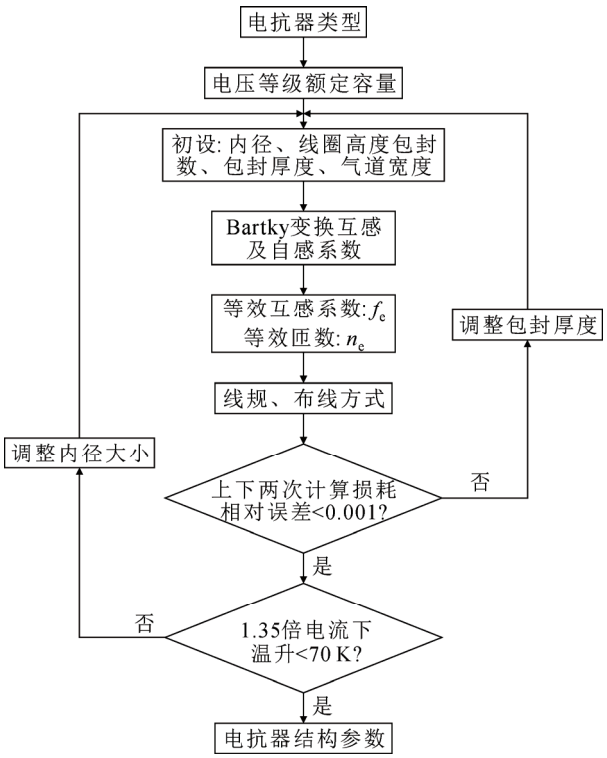


图 5 新型无环流电抗器设计流程图

Fig.5 Design process diagram of a novel non-circulating current reactor

表 2　新型干式空心电抗器的设计参数

Table 2　Design parameters of a novel dry air core reactor

参数	设计值	参数	设计值
载流量/A	270.27	包封数目	5
外径/mm	970	设计电感/mH	5.307
内径/mm	510	线圈高度/mm	465
组合线数	4	星架臂数	4
气道宽度/mm	25	等效匝数	105
损耗/W	2 099.9	温升/K	48

抗器相间距大于 1.7*D*)，本文设计的电抗器结构受到了一定限制，在后续最优设计时，可循环计算不同内径、不同高度下满足目标电感值的设计方案，形成设计方案组(电抗器温升符合行业标准温升限值)，核算用线成本，以用线成本为最少的一种作为电磁结构最优的设计方案。图 6(a)为单层线圈绕制时的工艺，图 6(b)为绕制成型的新型电抗器线圈结构，其中为了降低磁场损耗，选择上下星架臂处分别垫加厚度为 30 mm 的端绝缘垫块。

将绕制成型的电抗器线圈进行环氧树脂材料浸渍(传统电抗包封绝缘采用绕包工艺，绝缘厚度较大)，由于未进行包绕，因此新型电抗器的包封厚度显著减小，并将浸渍好的电抗器进行高温固化处理，固化完成后对电抗器外表面进行相应的喷砂、喷漆等工艺，以提高电抗器在长期运行环境中的可靠性。

以 DL 462-92《高压并联电容器用串联电抗器订货技术条件》、GB/T 1094.62011 《电力变压器第 6 部分：电抗器》作为试验依据，分别包括对制作的新型电抗器进行绝缘电阻、直流电阻、损耗、品质因数、耐压、温升、雷电冲击、匝绝缘等型式及特殊试验，本文以试验获得的电抗值、损耗、温升进行比对分析，其中进行型式试验的测试温度为 15 ℃，测试结果如表 3—表 5 所示。

根据型式试验测试结果与设计计算结果对比可知，本文在电感值、损耗、温升的计算结果与实测值基本一致，仅在电感值设计时，由于考虑国家标准规定其偏差在 0~5%范围内，且由于厂家的工艺系数可能与设计值存在偏差(轴向、幅向膨胀系数)，设计时将目标电感值设定为正偏差 1.5%，因此设计值与实测值基本一致。

将制作的新型干式空心电抗器在黑龙江省某 220 kV 变电站于 2024 年初冬季进行投运，在施工前期以对需替换电抗器的结构尺寸定、安装位置等



(a) 单层线圈绕制　(b) 整体线圈绕制

图 6　新型干式空心电抗器线圈绕制工艺

Fig.6　Coil winding process of a novel dry air core reactor

表 3　型式试验下电抗器电感测量结果

Table 3　Reactor inductance measurement results of type test

参数	额定电感/mH	实测电感/mH	偏差/%
测试值	5.232 0	5.308 3	1.46

表 4　型式试验下电抗器损耗测量结果

Table 4　Reactor loss measurement results of type test

参数	额定损耗/kW	校正损耗 (75 ℃)/kW	校正损耗 (120 ℃)/kW
测试值	1.702 9	1.989 2	2.206 8

表 5　型式试验下电抗器温升试验结果

Table 5　Reactor temperature rise measurement results of type test

参数	电阻测量/Ω		绕组温升/K
	冷电阻	热电阻	
测试值	16.723×10^{-3}	$20.188\ 5\times10^{-3}$	44.0

准备工作进行确认，新型电抗器的安装现场如图 7 所示。

与传统电抗器(替换的电抗器)相比，新型电抗器的外径尺寸降低了 23%，单台体积减小了约 40%(传统电抗器体积为 2.36 m^3，而新型电抗器体积为 1.37 m^3)；1.35 倍额定电流下传统电抗器的温升 65 K，新型电抗器温升 44 K，整体温升下降了约 32%.。

4　结论

本文针对传统空心电抗器在设计上的不足，提出了一种无环流空心电抗器设计的新方法，并开展了全新的电磁结构理论计算及验证工作，从根本上解决了传统电抗器内部环流产生发热这一严重问题，具体获得结论如下：

1）设计的新型无环流空心电抗器空间结构对



(a) 需替换的传统干式空心电抗器



(b) 安装后新型干式空心电抗器

图 7 新型电抗器的现场安装

Fig.7 On-site installation of a novel reactor

称，各包封中可单一线规(由传统多种小圆线规转变为 1 种或 2 种线规的组合线)，理论上电抗器各包封中将无环流产生。

2）新型无环流空心电抗器在内部布线时需考虑各包封等温升时的约束条件，通过组合导线的合理选取可使得设计电抗包封温升近似相等，但同时需进一步考虑设计电感值与实际电感值负误差所带来的影响。

3）通过本文新型无环流空心电抗器的理论方法，设计并制备了电抗率为 6%，额定容量为 120 kVA 的 10 kV 电压等级无环流空心电抗器，通过了型式及特殊试验验证，并已经实现挂网运行，进行长期带电考核。

本文设计时为了消除结构方式造成匝间电压过高引起的绝缘失效的风险，制造时加强了匝间绝缘，因而绝缘使用成本较传统电抗器更高。但根据本文的计算，相同电压等级、相同容量的电抗器，本文设计的电抗器所需线中更少，体积更小，因而总体成本将更低。

为进一步将本文提出的新型无环流空心电抗器进行推广，现阶段正在开展 35 kV/20 MVA 空心并联电抗器的设计及样机制作，并将于冬季挂网运行。本文提出的电抗器电磁结构设计新方法及可行性验证，该类型电抗器适用于推广至我国高寒地区使用，提高寒地新型电力系统的运行可靠性，打破了传统固有的设计理念，将有望进一步推进空心电抗器制造行业的发展。

参考文献 References

[1] 祝令瑜，杜一鸣，高 璐，等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3201-3209.
ZHU Lingyu, DU Yiming, GAO Lu, et al. Vibration distribution characteristics of dry-type air-core reactor with turn-to-turn insulation defects excited by different frequencies[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3201-3209.

[2] 郑 涛，赵彦杰. 超/特高压可控并联电抗器关键技术综述[J]. 电力系统自动化，2014，38(7)：127-135.
ZHENG Tao, ZHAO Yanjie. Overview of key techniques of EHV/UHV controllable shunt reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 127-135.

[3] 侯启鑫，李庆民，邹 亮，等. 桥臂电抗器轴向分割结构的优化设计方法[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3946-3954.
HOU Qixin, LI Qingmin, ZOU Liang, et al. Optimized methodology of axial partition structure for bridge arm reactor[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3946-3954.

[4] LEI X, XU J Y, FENG B, et al. Lightning faults of DC dry-type air-core reactor in HVDC substation[J]. Energy Reports, 2022, 8(S5): 1378-1385.

[5] 苗俊杰，姜庆礼. 500 kV 变电站 35 kV 干式电抗器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2012，33(2)：65-69.
MIAO Junjie, JIANG Qingli. Fault analysis of a 35 kV dry-type reactor in 500 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2012, 33(2): 65-69.

[6] 刘海莹，魏 宾. 干式空心电抗器的运行分析及故障处理[J]. 高压电器，2004，40(3)：239-240.
LIU Haiying, WEI Bin. Operation and maintenance of dry air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 239-240.

[7] 刘书瀚，庄 园，梁 战，等. 含直流断路器的柔直配电网过电压与绝缘配合[J]. 电力工程技术，2023，42(3)：61-71，80.
LIU Shuhan, ZHUANG Yuan, LIANG Zhan, et al. Overvoltage and insulation coordination of flexible DC distribution network with DC circuit breaker[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 61-71, 80.

[8] 杨国华，王文豪，陈 蕾，等. 平波电抗器绝缘校核仿真的高效降阶算法研究[J]. 高压电器，2023，59(5)：68-74，83.
YANG Guohua, WANG Wenhao, CHEN Lei, et al. Efficient algorithm study of reduced order modeling for smoothing reactor insulation verification[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 68-74, 83.

[9] 赵春明，冷 俊，杨晶莹，等. 干式空心电抗器应变检测方法及低温条件下应变特性[J]. 绝缘材料，2023，56(1)：82-89.
ZHAO Chunming, LENG Jun, YANG Jingying, et al. Strain detection method and strain characteristics under low temperature for dry-type air-core reactor[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 82-89.

[10] 张文明，李 威，刘亚林，等. 35 kV 干式空心串联电抗器烧毁原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿，2022，43(5)：57-63.
ZHANG Wenming, LI Wei, LIU Yalin, et al. Analysis cause burn-out of 35 kV dry-type air-core series reactor[J]. Power Capacitor Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 57-63.

[11] HUANG X B, HU J, ZHU Y C, et al. Research on the online measuring technology of inter-turn insulation of dry air-core reactor[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(9): 817-823.

[12] 袁发庭，吕　凯，唐　波，等. 干式铁心电抗器电磁-热-结构多物理场耦合仿真及协同优化研究[J]. 电网技术，2022，46(7)：2823-2833.
YUAN Fating, LÜ Kai, TANG Bo, et al. Coupling simulation and collaborative optimization of electromagnetic, thermal and structural multi-physical fields for dry-type core reactor[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2823-2833.

[13] 侯世英，王留洋，杨　帆，等. 桥臂电抗器的振动噪声分析与控制[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2385-2396.
HOU Shiying, WANG Liuyang, YANG Fan, et al. Vibration noise analysis and control of bridge arm reactor[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2385-2396.

[14] 毛颖科，张天枫，朱正一，等. ±500 kV 直流换流阀用饱和电抗器温度场与电场仿真研究[J]. 高压电器，2024，60(1)：128-135.
MAO Yingke, ZHANG Tianfeng, ZHU Zhengyi, et al. Simulation study on thermal and electric field of saturable reactor for ±500 kV converter valve[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 128-135.

[15] 姜志鹏，周　辉，宋俊燕，等. 干式空心电抗器温度场计算与试验分析[J]. 电工技术学报，2017，32(3)：218-224.
JIANG Zhipeng, ZHOU Hui, SONG Junyan, et al. Temperature field calculation and experimental analysis of dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 218-224.

[16] 陈　嵘，杨松伟，程　泳，等. 干式空心并联电抗器电磁-流体-温度场耦合计算与分析[J]. 高电压技术，2017，43(9)：3021-3028.
CHEN Rong, YANG Songwei, CHENG Yong, et al. Electromagnetic-fluid-temperature coupling calculation and analysis of dry-type air-core shunt reactor[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 3021-3028.

[17] 杨振宝，黄文武，赵彦珍，等. 基于 ANSYS Maxwell 的干式空芯电抗器匝间短路故障瞬态特性的仿真分析[J]. 实验科学与技术，2018，16(6)：50-53.
YANG Zhenbao, HUANG Wenwu, ZHAO Yanzhen, et al. Simulation analysis on transient characteristics of inter-turn short circuit fault of dry-type air-core reactor based on ANSYS maxwell[J]. Experiment Science and Technology, 2018, 16(6): 50-53.

[18] XU G, ZOU L, ZHANG L, et al. Investigation on small-scale experiments of magnetic field around air-core reactors[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 521: 389-393.

[19] 朱东柏，马春秋. 等电阻电压法在空心干式电抗器设计中的应用[J]. 变压器，1994，31(7)：21-23.
ZHU Dongbai, MA Chunqiu. Application of isoresistive voltage method in the design of air-core dry-type reactors[J]. Transformer, 1994, 31(7): 21-23.

[20] 朱东柏，马迎新. 干式户外空心电抗器的一种设计方法[J]. 哈尔滨电工学院学报，1996，19(1)：54-59.
ZHU Dongbai, MA Yingxin. A desigining method for air-core power reactor[J]. HIET Journal, 1996, 19(1): 54-59.

[21] 李中元，王鲁昕，张洪达，等. 基于等温升法的交直流混合干式空心电抗器设计[J]. 变压器，2019，56(11)：6-11.
LI Zhongyuan, WANG Luxin, ZHANG Hongda, et al. Design of dry-type air-core reactor under AC/DC hybrid conditions based on isothermal rise method[J]. Transformer, 2019, 56(11): 6-11.

[22] 陈　锋，巴　灿，徐玉东，等. 矩形截面导线绕制的干式空心电抗器优化设计方法[J]. 电工技术学报，2019，34(24)：5115-5125.
CHEN Feng, BA Can, XU Yudong, et al. Optimum design of dry-type air-core reactor wound with wire of rectangular cross-section[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5115-5125.



张明泽
1992—，男，博士，副教授，硕导
主要从事高压电器绝缘性能诊断与性能评估及电抗器电磁结构优化设计的研究工作
E-mail: zhangmingze @hrbust.edu.cn

ZHANG Mingze
Ph.D.
Associate professor



王炳杰
2000—，男，硕士生
主要从事变压器绝缘状态分析及空心电抗器结构设计的研究工作
E-mail: 1422318949@qq.com

WANG Bingjie



刘　骥(通信作者)
1972—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备状态评价技术、高电压新技术应用和电力电子装置应用的研究工作
E-mail: liuji@hrbust.edu.cn

LIU Ji
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2024-05-04　修回日期　2024-07-03　　编辑　卫李静