



引用格式: 赵仲勇, 陈宇, 李阎君, 等. 基于等效电路和温度场模型的 10 kV 干式铁芯串联电抗器故障的影响因素分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(36): 15469-15475.

Zhao Zhongyong, Chen Yu, Li Yanjun, et al. Analysis of influencing factors of 10 kV dry type iron core series reactor fault based on equivalent circuit and temperature field model[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(36): 15469-15475.

基于等效电路和温度场模型的 10 kV 干式铁芯串联电抗器故障的影响因素分析

赵仲勇¹, 陈宇¹, 李阎君², 韩孟媛¹, 于跃强¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 国网重庆市电力公司璧山供电分公司, 重庆 402760)

摘要 在电力系统中, 串联电抗器常用于限制电网中的短路电流和高次谐波。然而, 由于绝缘老化、电压波动、谐波以及外界环境等因素的影响, 电抗器会在运行中产生缺陷, 严重时会引起烧毁甚至爆炸等事故。其中谐波与温升是引起电抗器绝缘缺陷的重要因素。为提供一种谐波以及温升对 10 kV 干式铁芯串联电抗器故障的影响的分析思路以便于其运行维护, 以一台型号为 CKSC-300/10-5 的串联电抗器为例, 通过建立其等效电路和温度场模型, 分析并研究了两种因素对该电抗器烧毁故障的作用效果。结果表明: 在选取合适的电抗率下, 谐波并不是造成此电抗器烧毁故障的最直接的因素; 经过温度场仿真分析, 温升也不是造成此电抗器烧毁的直接因素之一, 仍需进一步考虑其他故障原因的影响。

关键词 串联电抗器; 故障; 谐波分析; 温度场; 仿真分析

中图分类号 TM472; 文献标志码 A

Analysis of Influencing Factors of 10 kV Dry Type Iron Core Series Reactor Fault Based on Equivalent Circuit and Temperature Field Model

ZHAO Zhong-yong¹, CHEN Yu¹, LI Yan-jun², HAN Meng-yuan¹, YU Yue-qiang¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Bishan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402760, China)

[Abstract] In the power system, the series reactor is often used to limit short-circuit current and high-order harmonics in the power grid. However, due to the influence of insulation aging, voltage fluctuation, harmonic and external environment, the reactor produces defects in operation and even cause accidents such as burning or explosion. Among them, harmonic and temperature rise are the important factors causing insulation defects of the reactor. In order to provide an analysis idea of the influence of harmonics and temperature rise on the fault of 10 kV dry-type iron core series reactor for its operation and maintenance, taking a series reactor of CKSC-300/10-5 as an example, through the establishment of its equivalent circuit and temperature field model, the effect of two factors on the burnout fault of the reactor was analyzed and studied. The results show that the harmonic is not the most direct factor to cause the burnout of the reactor under the appropriate reactance rate. The temperature rise is not one of the direct factors to cause the burnout of the reactor through the simulation analysis of the temperature field, and the influence of other fault causes still needs to be further considered.

[Keywords] series reactor; fault; harmonic analysis; temperature field; simulation analysis

电抗器在电力系统限制电网中的短路电流和高次谐波方面起着重要作用^[1]。文献[2-5]中, 若电网电压长期处于波动状态, 则会导致电抗器为控制电压合格率处于频繁投切状态, 而频繁的投切会对电抗器本身会造成一定的损伤。文献[6-7]中, 电抗器材质易受到绝缘老化的影响, 而导致匝间绝缘操作过电压耐受特性按指数规律下降。文献[8-9]中, 外部环境会影响电抗器本身的固有频

率和振幅, 如下部油箱的突出位置的受力情况能影响设备的自身振动情况。文献[10]中, 电网中的谐波会与电抗器产生谐振, 导致过电流, 从而引发严重的安全事故。综上所述, 电抗器受到电压波动、绝缘老化、外界环境以及谐波等因素的影响, 电抗器会失去其本身对于电力系统的作用, 因此有必要采取措施对电抗器的状态进行检测和诊断^[7-10], 并对其故障原因进行分析^[11-13], 确保电抗器运行状态

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(51807166); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0236)

第一作者: 赵仲勇(1988—)男, 汉族, 四川广元人, 博士, 副教授。研究方向: 电气设备状态评估及故障诊断技术、脉冲功率技术。E-mail: zhaoy1988@swu.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

良好,保证电力系统的安全运行。

目前,开展电抗器故障原因分析适用性较广的方法有两种:①直接对故障发生之后的实例进行分析得到其原因。②利用仿真软件模拟电抗器的运行状态然后分析得到其结果。

在对电抗器实例分析中,吴红波^[14]分析了一起串联电抗器烧毁事故,发现了其事故原因为电抗器容量不匹配;张静等^[15]分析了一起35 kV油浸式并联电抗器的事故,发现了其事故原因为局部过热以及放电故障。在对电抗器进行模拟仿真分析中,田聪等^[16]模拟了并联电抗器铁芯振动;黄文武等^[17]对干式空心电抗器匝间短路故障前后的场路进行了建模仿真;陈隽等^[18]建立了三维流-固耦合温度场仿真模型对油浸式空心电抗器的局部过热故障进行模拟分析。

电抗器在运行中遭受的各种故障因素,均可能对电抗器本体的正常运行产生严重影响^[19-20]。例如,温升过高会导致局部过热而使加速电抗器老化,若有甚者会导致电抗器烧毁;谐波不匹配,会导致谐波污染等油浸式电抗器的用油不纯,会导致局部过热;电压波动过大,会导致电抗器局部击穿等。但是,现有关于电抗器故障因素分析及诊断的报道中,大多都是通过发生故障后实际案例的电抗器外观以及烧毁情况进行分析判断,另一部分的工作重点则是在故障诊断以及监测方法制定上,而对其影响因素少有研究分析,且对常用的10 kV干式铁芯串联电抗器少有学者进行探讨。

为此,提出一种基于等效电路和温度场模型的10 kV干式铁芯串联电抗器故障的影响因素分析思路。将结合一台型号为CKSC-360/10-5的10 kV串联铁芯干式电抗器的情况及其运行环境,针对谐波与温升这两种因素进行分析和探讨。首先采用对系统线路的谐波电压与谐波电流进行理论与建模计算,分析故障干式铁芯串联电抗器电抗率与该线路的谐波是否匹配;然后结合故障干式铁芯串联电抗器的结构和材料进行仿真计算,讨论其工况以及谐波作用下的发热情况,并结合制造工艺等其他因素,分析温升对故障的影响。此思路有利于对于10 kV干式串联铁芯电抗器进行运行维护和影响因素分析并且为电抗器的研究分析提供了参考。

1 理论分析

1.1 在谐波作用下电抗器的电路建模

为了分析10 kV铁芯串联电抗器支路的谐波匹配情况,建立其等效电路模型如图1所示。考虑到系统的复杂性,将谐波源简化接入10 kV母线侧。

10 kV侧简化电路图如图1(a)所示,其等效的电路图如图1(b)所示。

通常情况下,10 kV负荷阻抗远远大于系统线路等效短路阻抗,即 $X_f \leq X_s$,因此负荷支路可忽略不计。另外,又由于 $nX_s \geq R_s$,所以系统电阻 R_s 也可以忽略。

串联电抗器的电抗率为

$$K = \frac{X_L}{X_C} \quad (1)$$

由图1所示等效模型和基尔霍夫定律可得

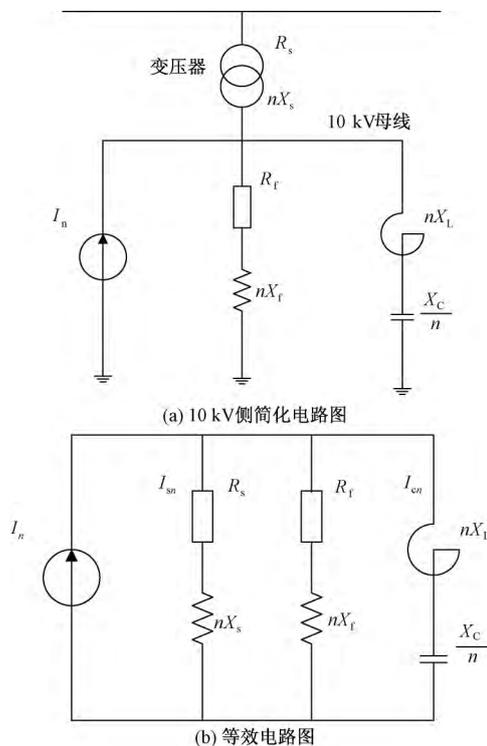
$$I_{cn} = I_n \frac{nX_s}{nX_s - (1 - n^2K)X_C/n} \quad (2)$$

$$I_{sn} = I_n \frac{-(1 - n^2K)X_C/n}{nX_s - (1 - n^2K)X_C/n} \quad (3)$$

谐波电流放大倍数为

$$K_{cn} = \frac{I_{cn}}{I_n} = \frac{nX_s}{|nX_s - (1 - n^2K)X_C/n|} \quad (4)$$

$$K_{sn} = \frac{I_{sn}}{I_n} = \frac{|(1 - n^2K)X_C/n|}{|nX_s - (1 - n^2K)X_C/n|} \quad (5)$$



n 为谐波次数; I_n 为谐波源的 n 次谐波电源; R_f 为10 kV侧负荷阻抗的电阻分量; X_f 为负荷阻抗的电抗基波分量; R_s 为系统等效短路阻抗的电阻分量; X_s 为系统等效短路阻抗的电阻分量; X_C 为并联电容器的基波电容; X_L 为串联电抗器基波电抗; I_{sn} 为流入系统侧的谐波电流; I_{cn} 为流入电容器组的谐波电流

图1 10 kV侧简化电路图和等效电路图

Fig. 1 Simplified circuit diagram and equivalent circuit diagram on 10 kV side

式中: K_{cn} 为流入电容器支路的谐波放大倍数; K_{sn} 为流入系统的谐波电流放大倍数。

当 $(1 - n^2K) X_C/n = 0$, 即铁芯串联电抗器与补偿并联电容器发生串联谐振, 谐振次数为

$$n = \sqrt{1/K} \tag{6}$$

此时谐波电流完全流入电容支路, 流经系统的谐波电流为 0。

当 $nX_s - (1 - n^2K) X_C/n = 0$, 即铁芯串联电抗器支路与系统侧发生并联谐振, 谐振次数为

$$n = \sqrt{\frac{1}{X_s/X_C} + K} \tag{7}$$

此时流过电容器支路的谐波电流远大于谐波源的谐波电流。

当 $nX_s > |nX_s + nX_L - X_C/n|$, 即 $I_{cn} > I_n$, 流过电容器支路的谐波电流将被放大。此时有

$$\sqrt{\frac{1}{2X_s/X_C + K}} < n < \sqrt{\frac{1}{K}} \tag{8}$$

当 $nX_s < |nX_s + nX_L - X_C/n|$, 即 $I_{cn} < I_n$, 流过电容器支路的谐波电流将被减小, 此时有

$$n < \sqrt{\frac{1}{2X_s/X_C + K}} \text{ 或 } n > \sqrt{\frac{1}{K}} \tag{9}$$

因此, 串联电抗器的电抗率需要避开串联谐振点与并联谐振点。基于此, 所选的电抗率不应该使流过电容器支路的谐波电流被放大。如此, 串联电抗器的电抗率选择需要以式(9)作为依据。此外, 电容支路对于各次有威胁性谐波的最低次谐波阻抗为感性, 则需要在最低次有威胁性谐波以上次谐波使电容支路避开呈现出的容性, 则选择的判据 $n > \sqrt{1/K}$ 较好。

1.2 干式串联电抗器温度场分析

1.2.1 铁芯电抗器的热源分析

干式铁芯串联电抗器可从电抗器工频电流和谐波电流下的自身损耗产热获得热量。干式铁芯串联电抗器在运行时, 铁芯和绕组内会产生损耗, 这些损耗将转变为热量, 从而引起铁心电抗器的温度变化。

$$P = P_{Cu} + P_{Fe} \tag{10}$$

式(10)中: P 为总共的损耗, kW; P_{Cu} 为绕组损耗, kW; P_{Fe} 为铁芯损耗, kW。

铁磁元件在交流信号作用下的铁芯损耗 P_{Fe} 主要包括磁滞损耗 P_h 和涡流损耗 P_e 。通常用 Steinmetz 公式进行计算, 即

$$P_{Fe} = P_h + P_e = C_h f B_m^n V + C_e \Delta^2 f^2 B_m^2 V = W_h f + W_e f^2 \tag{11}$$

式(11)中: C_h 为磁滞损耗常数; B_m 为铁芯磁通峰值, Wb; C_e 为涡流损耗常数; Δ 为硅钢片厚度, m; f

为频率, Hz; V 为铁芯体积, m^3 ; W_h 和 W_e 分别为每个磁化周期产生的单位磁滞和涡流损耗, kW/m^3 。

通过电抗器每层线圈的电阻和每层线圈的电流计算电阻损耗, 即

$$P_{cu} = \sum_{i=1}^n I_i^2 R_i \tag{12}$$

式(12)中: I_i 为第 i 层线圈的电流, A; R_i 为第 i 层线圈的电阻, Ω 。

绕组和铁芯内的热源强度按单位体积热率给出, 即

$$q = \frac{P}{v} \tag{13}$$

式(13)中: v 为电抗器铁芯或绕组的体积, m^3 ; q 为单位面积的热流密度, W/m^2 ; P 为热量损耗, W。

铁芯电抗器在工频作用下的等效电路模型如图 2 所示, 忽略了铁芯的饱和与非线性特性。根据图 2 所示等效电路, 运用叠加定理, 将电源中的每个谐波分量看作独立电源, 分别叠加到电抗器上, 得到铁芯电抗器在谐波作用下的等效电路模型(图 2)。

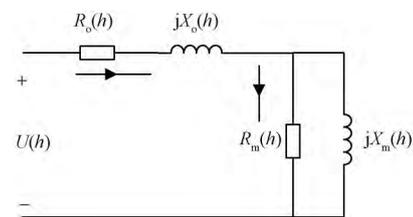
利用计算机程序控制以生成各次谐波, 并通过铁磁元件的空载实验和短路试验, 获取电阻参数。通过不同次数的谐波多次对铁磁元件进行空载和短路实验, 每次实验均可获取一组参数值。运用数值方法对这些参数进行处理, 得到指数拟合的数学表达式为

$$R = a_0 + a_1 f + a_2 f^2 \tag{14}$$

式(14)中: R 为通过曲线拟合计算后的电阻值, Ω ; a_1 、 a_2 、 a_3 为系数。

1.2.2 温度场仿真的三维模型

利用 ANSYS Icepak 建立的电抗器三维仿真模型如图 3 所示。对以上建模过程在不影响结果精确



R_o 为绕组的电阻, 反映了绕组的损耗; X_o 为绕组的漏抗; R_m 为激磁电阻, 表征了铁芯损耗; X_m 为激磁电抗, 表征了铁芯磁化性能, 与主磁通的电抗对应, 正比于主磁路的磁导; h 为谐波次数; $R_o(h)$ 为 h 次谐波影响下绕组电阻; $X_o(h)$ 为 h 次谐波影响下绕组漏抗; $R_m(h)$ 为 h 次谐波影响下的激磁电阻; $X_m(h)$ 为 h 次谐波影响下的激磁电抗;

j 为虚数单位; $U(h)$ 为 h 次谐波下对应的电压幅值

图 2 铁芯电抗器工频作用下等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model under power frequency action of iron core reactor



图3 铁芯电抗器三维温度场仿真模型

Fig. 3 Three-dimensional temperature field simulation model of iron core reactor

度的情况下做如下基本简化。

(1) 考虑到绕组出线端对于电抗器整体温度影响较小,对于高、低压绕组出线端子进行了隐化处理。

(2) 铁芯是由多层硅钢片叠加而成,铁芯柱外围边缘呈现阶梯状,各硅钢片之间又有很薄的绝缘油。在建模时对铁芯进行了简化处理,忽略了片间绝缘的影响,将铁芯作为一个整体考虑。

(3) 绕组内部包括多层铜材料及其匝间绝缘材料,如果分别建立精细化模型,不利于网格剖分,并且计算量非常大。因此,将绕组及其内部作为整体考虑,进行了简化处理。

2 谐波对 10 kV 干式铁芯串联电抗器

根据某 110 V 变电站的实际运行情况,得到线路 10 kV 侧的谐波电压电流情况,如表 1、表 2 所示。可知该线路存在的主要谐波为 5 次谐波,并且谐波含量也在国家标准规定的限值内^[21]。

该变电站 10 kV 侧串联电抗器型号为 CKSC-300/10-5,额定电压为 10 kV,额定容量 300 kvar,额定电感 3.240 mH,感抗 1.02 Ω,电抗率设计为 5%;10 kV 侧电容器每组三相容量为 5 000 kVar,每相电容器的容值为 165 μF;系统最小运行方式下的短路阻抗为 0.67 Ω。

表 1 10 kV 侧谐波电压畸变率

Table 1 10 kV side harmonic voltage distortion rate

谐波次数	5	7	11	13	17	19	23
畸变率/%	1.8	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2

表 2 10 kV 侧谐波电流畸变率

Table 2 10 kV side harmonic current distortion rate

谐波次数	5	7	11	13	17	19	23
畸变率/%	6.3	2.3	1.8	1.5	0.8	0.5	0.6

根据以上数据,计算得每相电容器的容抗为

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = 19.3 \Omega \quad (15)$$

式(15)中: ω 为电力系统的角频率,rad/s; C 为每相电容的容值。

串联电抗器的实际电抗率为

$$K = \frac{X_L}{X_C} = 5.3\% \quad (16)$$

根据数据计算可知,其满足铁芯串联电抗器与补偿并联电容器发生串联谐振,得到对应的谐振次数为

$$n = \sqrt{1/K} = 4.34 \quad (17)$$

显然,10 kV 侧最主要的谐波含量为 5 次及以上次谐波,5.3% 的电抗率完全可以使得电抗器支路在 5 次谐波及以上呈现出感性,从而避免在高次谐波下谐振现象的发生,流过电容器支路的谐波电流将被减小,同时又能使得电容在基波下继续起到并联补偿的作用。此外,若电抗器电抗率 K 取 5%, n 将会增加到 4.47,也不及主要的谐波次数 5 次。

结合变电站的主要谐波水平,该变电站 10 kV 铁芯串联电抗器的电抗率选择恰当,谐波并不是造成电抗器损毁的最直接和主要的因素。但考虑到 n 的值与主要存在的谐波次数 5 差距不是很大,流经电抗器支路的电流也会含有一定的谐波分量。因此,谐波对电抗器会有一定的影响,但表现为累积作用,在长期谐波因素作用下,电抗器的绕组等部件会出现不同程度的老化。

3 10 kV 干式铁芯串联电抗器温度场仿真

3.1 温度场的热源计算

根据电抗器的型号与《高压并联电容器用串联电抗器》(J/BT 5346—2014)得到工频额定电流下的损耗值应符合式(18)计算

$$\sum P = K_p S_n^{0.75} \quad (18)$$

式(18)中: $\sum P$ 为电抗器在工频额定电流下的损耗值,kW; S_n 为额定容量,kV·A; K_p 为损耗系数,经查表对应电抗器为 52。

计算得该电抗器的损耗应不超过 3.75 kW。另外,查表得该电抗器的额定端电压为 318 V。电抗器额定电流的计算公式为

$$I_n = \frac{S_n}{3U_n} \quad (19)$$

式(19)中: U_n 为额定端电压,V; I_n 为额定电流,A,经计算得该电抗器的额定电流为 315 A。

根据电抗器绕组的尺寸参数可得导体电阻计

算公式为

$$R_i = \rho \frac{L_i}{S_i} \quad (20)$$

式(20)中: R_i 为导体的电阻值; ρ 为电阻率; L_i 为第 i 层的总长度, m; S_i 为第 i 层导线的截面积, m^2 。

计算得单匝线圈的电阻为 0.305 mΩ, 整个线圈的电阻为 9.15 mΩ。根据式(11)计算得, 工频额定电流下的三相绕组损耗 P_o 为 2.72 kW, 则铁芯损耗 P_e 为 1.03 kW。

经过短路实验获得了谐波作用下的绕组电阻与基波作用下绕组电阻的关系^[22], 以及谐波作用下绕组漏感与基波作用下绕组漏感的关系, 即

$$R_o/R_o(50) = 0.966\ 360\ 814e^{0.000\ 537f} \quad (21)$$

同时经过载实验获得了谐波作用下的激磁电阻与基波作用下激磁电阻的关系, 以及谐波作用下激磁电感与基波作用下激磁电感的关系, 即

$$R_m/R_m(50) = 0.706\ 044\ 850\ 3 + 0.496\ 281\ 37 \times 10^{-2}f - 0.105\ 94 \times 10^{-5}f^2 \quad (22)$$

通过式(21)、式(22)得到与电抗器绕组损耗和铁芯损耗的表达式为

$$R_o(h)/R_o(1) = 0.966\ 360\ 814e^{0.026\ 85h} \quad (23)$$

$$R_m(h)/R_m(1) = 0.706\ 044\ 850\ 3 + 0.248\ 140\ 685h - 0.264\ 85 \times 10^{-2}h^2 \quad (24)$$

电抗器在 h 次谐波作用下产生的损耗为

$$P(h) = 3I_o^2(h)R_o(h) + 3I_m^2(h)R_m(h) \quad (25)$$

式(25)中: $I_o(h)$ 、 $I_m(h)$ 分别为图 2 中流过 $R_o(h)$ 、 $R_m(h)$ 的电流, A。

根据实测, 系统 5 次谐波电流平均畸变率为 6.3%, 基波损耗值计算得 5 次谐波作用下的绕组损耗 P_o 为 0.012 kW, 铁芯损耗 P_e 为 0.008 kW。将计算结果作为热分析的热源, 开展铁芯电抗器温度场分析。

3.2 仿真模型参数设置

电抗器的材料为流体材料, 其散热方式主要是空气的自然对流散热。各材料的物理属性参数如表 3 所示。

在完成对干式铁芯串联电抗器的建模后, 将模型整体划分为各个相邻的小单元。在综合计算速度

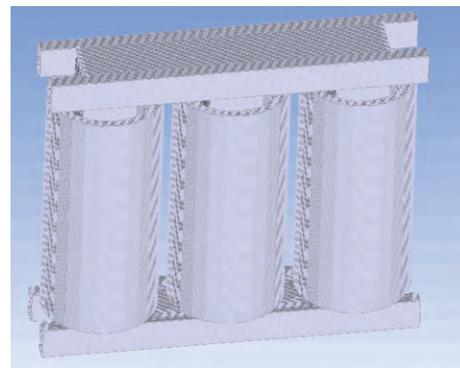
表 3 材料物理属性参数

Table 3 Physical property parameters of materials

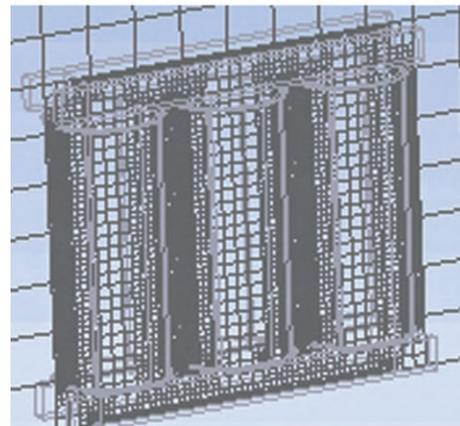
部位	铁心	绕组	绕组绝缘	底座	本体外
材料	硅钢	铜	树脂	铁	空气
密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7 650	8 900	1 370	7 850	1.205
比热容/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	460	390	1210	460	1 005
导热系数/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	51.9	380	0.2	20	0.025 9

与精确度的情况下, 针对绕组、空气部分, 由于它们形状比较规则有序, 故适合采用等大小的正六面体网格单元进行剖分; 针对空气流体部分和绕组的间隔部分形状较为复杂, 用规则形状网格难以完全覆盖, 因此采用大小不等的多个四面体网格单元进行剖分。划分结果如图 4 所示, 其中建立节点数为 329 928 个, 建立单元数为 647 911 个。干式铁芯串联电抗器在进行内部温度场分析时其热源主要是内部损耗, 即铁芯损耗和绕组损耗。在进行载荷施加时, 以热源计算的结果作为温度场分析的初始热源, 如表 4 所示。

另外对模型施加边界条件, 首先将模型环境温度设置为 20 °C, 外边界设为 wall; 下边界设置为入口区域, 其边界条件中的相对压强设为 0, 温度为环境温度; 上边界设置为出口区域, 相对压强设为 0, 温度满足自由边界条件不做设定。



(a) 有限元模型



(b) 内部网格剖分

图 4 铁芯电抗器模型局部网格剖分

Fig. 4 Local grid partitioning of core reactor model

表 4 干式电抗器载荷数据

Table 4 Load data for dry reactor

分类	铁芯损耗/kW	绕组损耗/kW
基波	1.03	2.72
谐波	0.008	0.012
基波 + 谐波	1.038	2.732

3.3 温度场仿真结果

基波与谐波对温度场造成结果各不相同,因此有必要将基波单独进行仿真分析后再整体叠加进行仿真分析。

3.3.1 基波下的温度分布

图5为基波损耗作用下铁芯电抗器的绕组温度场分布计算结果,绕组最热点温度为81.2℃,最大温度值位于绕组上端部,铁芯最热点温度为79.2℃,低于绕组最热点温度,最大温度值位于铁芯中相铁柱的中间段。由仿真结果可知,无论是电抗器铁芯还是绕组,最热点温度均在铁芯电抗器工作温度范围内,因此,温度不会对电抗器的安全运行造成较大影响。

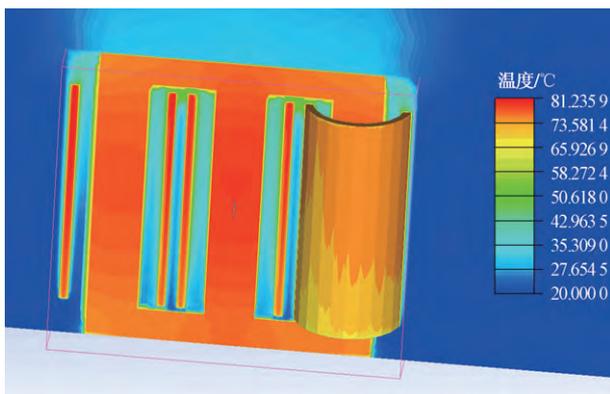


图5 铁芯电抗器基波损耗作用下的温度场仿真
Fig. 5 Temperature field simulation of iron core reactor under base wave loss

3.3.2 基波与谐波叠加下的温度分布

图6为基波电抗器温度场分布的仿真结果,最热点温度仍然位于绕组端部,温度达到81.5℃,比仅考虑基波损耗载荷的铁芯电抗器热点温度略高。根据南方电网设备标准技术规范《10 kV干式空心串联电抗器》规定,空心串联电抗器运行温升要求:平均温升为95 K;热点温升为100 K。变电站的工作环境温度平均为20℃,因此10 kV干式铁芯串联电抗器的运行温度不超过115℃为宜。仿真结果均在该温度范围内,表明基波与谐波作用对10 kV干式铁芯串联电抗器的运行影响较小。

4 结论

对串联铁芯电抗器进行了电路建模与理论分析,利用谐波作用下的模型和理论对某10 kV干式铁芯串联电抗器的电抗率匹配情况进行了计算说明。同时,建立了该干式铁芯串联电抗器的温度场模型,结合电抗器自身的结构参数进行温度场仿真计算,对比了不同激励作用下的温度场仿真结果,对此电抗器得到以下结论。

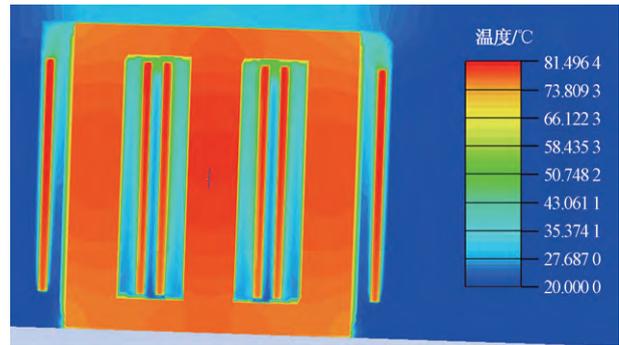


图6 铁芯电抗器基波和谐波损耗共同作用下的温度场仿真
Fig. 6 Simulation results of temperature field of iron core reactor under combined action of fundamental wave and harmonic loss

(1) 提供了一种谐波和温升影响因素的分析思路,有利于诊断分析10 kV干式铁芯串联电抗器的烧毁故障。

(2) 通过对干式铁芯串联电抗器支路进行电路建模与理论分析,发现变电站10 kV铁芯串联电抗器的电抗率选择恰当,谐波并不是造成电抗器损毁的最直接和主要的因素。

(3) 通过ANSYS软件建立了10 kV干式铁芯串联电抗器的电热仿真模型,表明基波与谐波损耗对10 kV干式铁芯串联电抗器的运行温度影响较小。

(4) 考虑到10 kV干式铁芯串联电抗器工作于电、磁、热、振动等复杂环境,温度、电压等多类因素共同作用可能会引起电抗器绕组绝缘的老化,以及可能发生放电等绝缘缺陷,导致电抗器的故障。因此仍需要进一步考虑其他故障因素。

参考文献

- [1] 徐基泰. 40年来电抗器技术的发展[J]. 变压器, 2004(3): 45-50.
Xu Jitai. Development of reactor technology in the past 40 years [J]. Transformers, 2004(3): 45-50.
- [2] 苏基潭. 一起35 kV干式电抗器匝间短路故障分析[J]. 冶金动力, 2021(3): 1-3.
Su Jitan. Analysis of an inter turn short circuit fault of 35 kV dry reactor [J]. Metallurgical Power, 2021(3): 1-3.
- [3] 周勤勇, 郭强, 卜广全, 等. 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007(7): 1-6.
Zhou Qinyong, Guo Qiang, Bu Guangquan, et al. Application of controllable reactor in China's UHV/UHV power grid [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2007(7): 1-6.
- [4] 索南加乐, 孙丹丹, 付伟, 等. 带并联电抗器输电线路单相自动重合闸永久故障的识别原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2006(11): 75-81.
Suonan Jiale, Sun Dandan, Fu Wei, et al. Study on identification principle of single-phase automatic reclosing permanent fault of transmission line with shunt reactor [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2006(11): 75-81.

- [5] 黄柳艳. 影响干式铁芯电抗器线圈涡流损耗的因素[J]. 电工技术, 2020(19): 92-94.
Huang Liuyan. Factors affecting eddy current loss in coils of dry iron core reactor[J]. Electrical Technology, 2020(19): 92-94.
- [6] 聂洪岩, 魏新劳, 姚远航, 等. 热老化对干式空心电力电抗器匝间绝缘操作过电压耐受特性的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(24): 5096-5104.
Nie Hongyan, Wei Xinlao, Yao Yuanhang, et al. Effect of thermal aging on over-voltage tolerance of dry-type hollow reactor interturn insulation operation[J]. Journal of Electrical Technology, 2020, 35(24): 5096-5104.
- [7] 张洁, 谭向宇, 王科, 等. 分布式布拉格传感器系统监测温度条件对干式空心电抗器的影响[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(16): 160-164, 180.
Zhang Jie, Tan Xiangyu, Wang Ke, et al. Influence of temperature condition monitored by distributed Bragg sensor system on dry type air core reactor[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(16): 160-164, 180.
- [8] 浦琪琦. 上海复兴 220 kV 变电站电抗器室减振降噪技术的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(27): 8161-8165, 8177.
Pu Qiqi. Application of vibration and noise reduction technology in reactor room of Shanghai Fuxing 220 kV Substation[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(27): 8161-8165, 8177.
- [9] 王伟, 韩金华, 李德志, 等. 河南电网 500 kV 并联电抗器运行状况分析[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 82-85.
Wang Wei, Han Jinhua, Li Dezhi, et al. Operation status analysis of 500 kV shunt reactor in Henan Power Network[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2009, 45(4): 82-85.
- [10] 汪梅. 探究谐波治理技术在变电站中的应用[J]. 电子测试, 2015(24): 28-29, 67.
Wang Mei. Exploring the application of harmonic control technology in substation[J]. Electronic Testing, 2015(24): 28-29, 67.
- [11] 杜淑文, 宋春燕, 祝春捷, 等. 10 kV 空心电抗器周围工频磁场的简化计算及影响范围[J]. 高压电器, 2006(3): 179-182.
Du Shuwen, Song Chunyan, Zhu Chunjie, et al. Simplified calculation and influence range of power frequency magnetic field around 10 kV hollow reactor[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2006(3): 179-182.
- [12] 王岩, 谭向宇, 束洪春, 等. 工艺偏差对干式空心电抗器局部温升的影响分析研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10): 182-186.
Wang Yan, Tan Xiangyu, Shu Hongchun, et al. Study on the influence of process deviation on local temperature rise of dry-type hollow reactor[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2016, 52(10): 182-186.
- [13] 苟烜齐, 刘轩东, 杨昊, 等. 匝间绝缘故障对干式空心电抗器电感参数影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 117-121, 127.
Gou Xuanqi, Liu Xuandong, Yang Hao, et al. Simulation study on the effect of inter-turn insulation failure on inductance parameters of dry-type hollow reactor[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2015, 51(10): 117-121, 127.
- [14] 吴红波. 一起因容量不匹配导致的串联铁芯电抗器烧坏事故分析[J]. 变压器, 2009, 46(8): 59-60.
Wu Hongbo. Analysis of a series core reactor burn-out accident caused by capacity mismatch[J]. Transformer, 2009, 46(8): 59-60.
- [15] 张静, 熊婷婷, 苗浩. 一起 35 kV 油浸式并联电抗器故障分析与处理[J]. 电力设备管理, 2020(11): 184-189.
Zhang Jing, Xiong Tingting, Miao Hao. Fault analysis and treatment of a 35 kV oil-immersed shunt reactor[J]. Power Equipment Management, 2020(11): 184-189.
- [16] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等. 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(3): 64-70.
Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al. Model experiment and simulation study on core vibration of shunt reactor[J]. New Technology of Electric Power, 2018, 37(3): 64-70.
- [17] 黄文武, 凌云, 吴玉坤, 等. 干式空心电抗器匝间短路故障特性的研究[J]. 变压器, 2017, 54(10): 14-18.
Huang Wenwu, Ling Yun, Wu Yukun, et al. Study on the characteristics of inter-turn short-circuit fault of dry-type hollow reactor[J]. Transformer, 2017, 54(10): 14-18.
- [18] 陈隽, 戴奇奇, 袁召, 等. 特高压油浸式空心电抗器温度场计算及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 87-95.
Chen Jun, Dai Qiqi, Yuan Zhao, et al. Temperature field calculation and influencing factors analysis of ultra-high pressure oil-immersed hollow reactor[J]. High Voltage Electrical Appliances, 2020, 56(1): 87-95.
- [19] 李国栋, 俞华, 刘宏, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘诊断[J]. 变压器, 2019, 56(12): 13-18.
Li Guodong, Yu Hua, Liu Hong, et al. Interturn insulation diagnosis of dry-type hollow reactor[J]. Transformer, 2019, 56(12): 13-18.
- [20] 凌云, 赵彦珍, 肖利龙, 等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1600-1607.
Ling Yun, Zhao Yanzhen, Xiao Lilong, et al. On-line monitoring method for inter-turn short-circuit fault of high voltage and large capacity dry air-core reactor[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(5): 1600-1607.
- [21] 蔺峰. 10 kV 线路的无功补偿和谐波治理[D]. 天津: 天津大学, 2010.
Lin Feng. Reactive power compensation and harmonic control for 10 kV line[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [22] 范春桥. 10 kV 干式变压器温度场仿真计算与寿命评估[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
Fan Chunqiao. Temperature field simulation calculation and life evaluation of 10 kV dry transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.