

干式空心并联电抗器投入瞬态电动力研究

沈宏伟¹, 马 仪², 崔志刚², 陈 磊², 王 科²
谭向宇², 陈文雯², 李 爽³, 王永红³

(1. 云南电网公司文山供电局, 云南 文山 663000; 2. 云南电网公司电力科学研究院 云南 昆明 650217; 3. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 为探究干式空心并联电抗器投入瞬态电动力对绝缘的破坏性, 以一台 BKDK-20000/35 大型电抗器为例, 利用 ANSYS 场-路耦合有限元分析方法, 对该电抗器的投入瞬态电动力进行了数值解析, 对瞬态电动力破坏绝缘的可能性进行了讨论. 研究表明, 投入瞬态过电流会产生强瞬态电动力, 瞬态电动力的分布极不均匀. 轴向电动力关于中心高度对称, 距中心高度处越远, 轴向电动力越大; 辐向电动力指向磁力线圆心所在线圈, 距该线圈越远, 辐向电动力越大. 轴向瞬态电动力对绝缘破坏性小, 幅向瞬态电动力对绝缘有一定的破坏性. 线圈与包封绝缘间脱层是瞬态电动力造成绝缘开裂的原因.

关键词: 干式空心并联电抗器; 投入; 瞬态电动力; 绝缘开裂**中图分类号:** TM472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)06-0093-05

Calculation of Inputting Transient Electromagnetic Force of Dry-type Air-core Shunt Reactor

SHEN Hong-wei¹, MA Yi², CUI Zhi-gang², CHEN Lei²,
WANG Ke², TAN Xiang-yu², CHEN Wen-wen², LI Shuang³, WANG Yong-hong³

(1. Wenshan Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid, Wenshan 663000, China; 2. Yunnan Electric Power Test and Research Group Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China; 3. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to explore the destructive impact on insulation, the inputting transient electromagnetic force of a dry-type air-core shunt reactor model BKDK-20000/35 is numerically solved with the ANSYS electromagnetic-circuit coupling finite element analysis method. The possibility of insulation failure caused by transient electromagnetic force is also discussed. Research results show that the transient over current generated by inputting the reactor can produce a strong transient electromagnetic force, which is distributed extremely uneven. The axial electromagnetic force is symmetric about the center height. The farther the height is away from the center height, the bigger the axial electromagnetic force is. The radial electromagnetic force points to the center coil which is on the center of magnetic field lines. The farther the coil is away from the center coil, the stronger the radial electromagnetic force is. The axial electromagnetic force has a small effect on the insulation, while the radial electromagnetic force has some damages to insulation. The delaminating between coils and envelopment insulation may lead to insulation cracking.

Key words: dry-type air-core shunt reactor; inputting; transient electromagnetic force; insulation cracking**收稿日期:** 2014-09-12**基金项目:** 中国南方电网公司项目(K-YN2013-160).**作者简介:** 沈宏伟(1969—), 男, 高级工程师;

李 爽(1990—), 女, 硕士研究生, E-mail: lishuang19901202@126.com;

王永红(1971—), 男, 博士, 教授.

0 引言

干式空心并联电抗器广泛应用于长距离输电线路对容性无功功率的补偿. 近几年,干式空心并联电抗器经常发生烧毁事故,甚至发生着火燃烧,给电力系统安全运行带来了隐患,也造成了较大的经济损失^[1-3].

开裂是引起干式空心电抗器烧毁的主要原因之一. 绝缘发生开裂后,由于雨水和脏污侵袭,会伴随受潮、脏污和局部放电发生,造成绝缘性能快速下降. 一旦引起匝间绝缘击穿,干式空心并联电抗器会迅速烧毁^[4-6].

随着负载无功功率的变化,干式空心并联电抗器需要频繁投切. 倪学锋等人在 1.35 倍额定电流下,经过反复投切 LKGKL-27.5-85.7-187.3 型干式空心并联电抗器,发现在投入电抗器时的冲击电流作用下,绕组与绕包绝缘会发生开裂^[7]. 因此,有必要对干式空心并联电抗器投入瞬态电力进行核算,并在此基础上采取防范措施.

干式空心并联电抗器并绕包封数量较多,每个包封内部又有 2~3 层线圈. 各线圈额定电流不同,而且电抗器的磁场分布发散,投入瞬态电力具有分散性,需要通过数值计算进行分析,目前普遍采用场-路耦合有限元方法. 刘志刚等人数值计算了 CKGK-1200/35-12 型干式空心串联电抗器的磁场分布^[8],又数值分析了它的瞬态电力变化规律^[9]. 赵延山数值计算了 BKGKL-20000/66 型干式空心并联电抗器各包封瞬态电力的分布规律^[10]. 35kV 电压等级,额定容量 20000kVA 的大型干式空心并联电抗器已经普遍使用,它具有更高的额定电流,但对于这种类型电抗器的瞬态电力没有文献进行数值计算,也没有文献明确瞬态电力对绝缘的破坏性.

探讨了干式空心并联电抗器投入瞬态电力计算原理,以一台 BKDK-20000/35 大型干式空心并联电抗器为例,建立了 ANSYS 场-路耦合有限元模型,通过数值计算得到了瞬态电力的变化规律和分布特性,讨论了瞬态电力对绝缘破坏的可能性.

1 投入并联电抗器的暂态过程

以单相为例,投入干式空心并联电抗器的简化

电路如图 1 所示. 图 1 中: U 为系统瞬态电压, i 为瞬态电流, K 为断路器, R 为电抗器等值电阻, L 为电抗器的等值电感. 当断路器 K 闭合,投入干式空心并联电抗器.

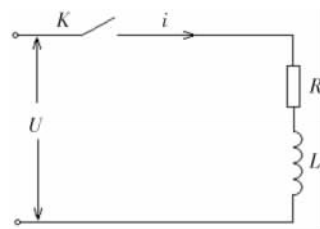


图 1 投入并联电抗器简化电路

设干式空心并联电抗器的额定电压为 U_N , 额定电流为 I_N , 工频电源角频率为 ω , 投入瞬间电压初相位为 α , 图 1 电路的电压方程为:

$$\sqrt{2}U_N \sin(\omega t + \alpha) = L \frac{di}{dt} + iR \quad (1)$$

对式(1)求解可以得到瞬态电流 i :

$$i = \sqrt{2}I_N \left[-\cos(\omega t + \alpha) + \exp\left(-\frac{R}{L}t\right) \cos\alpha \right] \quad (2)$$

投入干式空心并联电抗器后,流过并联电抗器的瞬态电流由一个稳态分量和一个暂态分量组成. 稳态分量是电抗器额定运行电流. 暂态分量按照指数规律不断衰减,大小与电压初相位 α 有关,当 $\alpha = 0$ 时最大. 暂态分量衰减速度由时间常数 $\tau = L/R$ 来确定,时间常数越大,衰减速度越慢. 如果时间常数足够大,电抗器投入 0.01s 时即 $\omega t = \pi$, 瞬态电流出现最大值 $2\sqrt{2}I_N$.

瞬态电流增加使干式空心并联电抗器的磁场强度和磁感应强度增大,各线圈导线上的电力由它的电流和所在位置磁感应强度的乘积来确定,则瞬态电力会成倍增加. 瞬态电流最大时,瞬态电力也会达到最大值.

2 电力数值计算原理

场-路耦合有限元分析通过同时解析磁场方程和电路方程来实现. 干式空心并联电抗器任一线圈的磁场方程和电路方程分别满足:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \nabla \phi + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$U = Ri - \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4)$$

式(3)与式(4)中, A 为电磁矢量位; ϕ 为电势标量位; U 为线圈端电压; i 为线圈电流; R 为线圈电阻; μ

为磁导率; σ 为导线电导率; Ψ 为磁链.

将以上方程离散化后, 可得到方程组:

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ [C^{iA}] & [0] & [0] \\ [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K^{AA}] & [K^{Ai}] & [0] \\ [0] & [K^{ii}] & [K^{ie}] \\ [0] & [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ J \\ e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中: $[C^{iA}]$ 为感应组逆矩阵; $\dot{A}$ 为时间微分; $[K^{AA}]$ 为位劲度矩阵; $[K^{Ai}]$ 为位—电流耦合劲度矩阵; $[K^{ii}]$ 为电阻劲度矩阵; $[K^{ie}]$ 为电流—电动势降耦合劲度系数; J 为节点电流密度; e 为节点电动势降.

磁感应强度 B 、磁场强度 H 都可以由节点电磁矢量位 A 计算出来:

$$B = \nabla \times A \quad (6)$$

$$B = \mu H \quad (7)$$

则线圈上任意体积 v 上所受的 Lorentz 力由下式计算:

$$F = \int_v N^T (J \times B) dv \quad (8)$$

其中, N 为形状函数矢量.

3 场—路耦合模型

3.1 并联电抗器基本参数

BKDK-20000/35 型干式空心并联电抗器额定电压为 35 kV, 额定容量为 20000 kVA, 高度为 2 450 mm. 各包封的线圈及额定电流参数见表 1.

3.2 场—路耦合模型建立

场—路耦合分析模型包括有限元模型和电路模型. BKDK-20000/35 型干式空心并联电抗器关于中心轴对称, 按照其几何尺寸大小, 建立了包含了空气、绝缘以及线圈为介质的二维有限元模型. 将各层线圈等效电路相并联, 外施一个独立电压源, 构成电路模型. 建立的场—路耦合模型如图 2 所示.

场—路耦合分析由有限元模型中的材料属性和几何尺寸计算出各线圈电阻、自感和互感, 再由电路模型计算出各线圈电流, 然后将该电流分别施加于有限元模型对应线圈上, 计算出磁场强度与磁感应强度, 进一步得到电力.

通过反复调整, 有限元模型采用了三角形六级自由剖分, 保证计算精确度的同时也最大限度地节约了计算时间.

表 1 并联电抗器各包封参数

包封	线圈	额定电流/A	包封	线圈	额定电流/A
1	1	15.00	8	22	28.76
	2	15.06		23	28.76
	3	15.07	9	24	27.34
2	4	14.44		25	27.27
	5	14.33	10	26	28.12
	6	14.19		27	28.28
3	7	16.40	11	28	31.48
	8	16.24		29	31.57
	9	16.17	12	30	31.66
4	10	16.28		31	31.69
	11	16.32	13	32	30.56
	12	16.42		33	30.59
5	13	19.22	14	34	30.81
	14	19.18		35	31.14
	15	19.19	15	36	34.04
6	16	22.20		37	34.57
	17	22.24	16	38	37.26
	18	22.33		39	37.39
7	19	22.63	17	40	35.08
	20	22.58		41	34.85
	21	22.53			

注 1: 标号 1 为最内部包封.

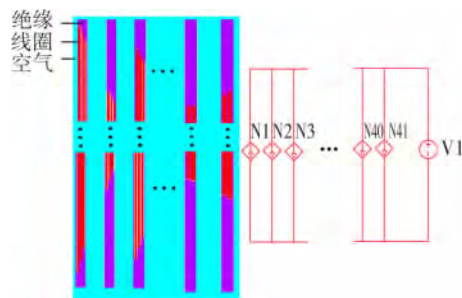


图 2 场—路耦合模型

4 瞬态电力数值计算结果

4.1 瞬态电力的暂态过程

电压源取电抗器的额定电压, 初始相位为 0. 以第一层线圈中心高度处 1 cm 高度描述瞬态电力的暂态过程, 数值计算结果如图 3 所示.

瞬态电力按照工频周期发生周期性变化. 随周期增加, 每周期的瞬态电力峰值逐步衰减, 在第 1 个周期的 0.01 s 时刻, 瞬态电力数值最大, 与式(2)表述的电流最大值时刻相对应.

4.2 瞬态电力分布特性

为了更好地描述瞬态电力的分布特性, 本文给出了 0.01 s 时刻电抗器的磁场分布特性. 磁力线分

布特性如图 4 所示,磁通密度分布特性如图 5 所示.

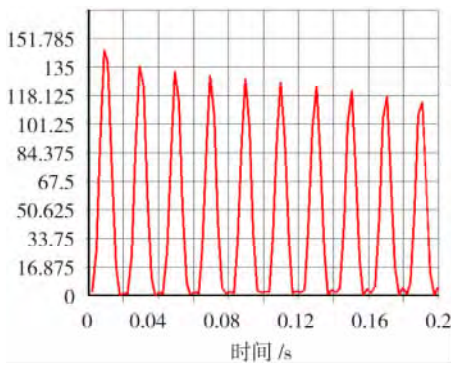


图 3 瞬态电力暂态过程

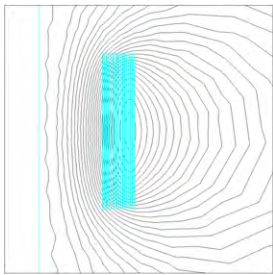


图 4 电抗器磁力线分布

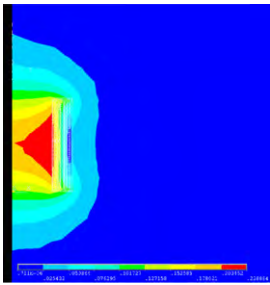


图 5 电抗器磁通密度分布

电抗器的磁场发散,轴向沿几何中心高度对称分布,幅向以第 15 包封内的第 36 个支路为中心分布,内外不对称,内部包封磁场远大于外部包封磁场.

以 1 cm 高度为基本单元,列举了 0.01 秒时刻多层线圈的瞬态电力分布规律.沿高度方向为正方向,轴向瞬态电力分布如图 6 所示;由内向外为正方向,幅向瞬态电力分布如图 7 所示.

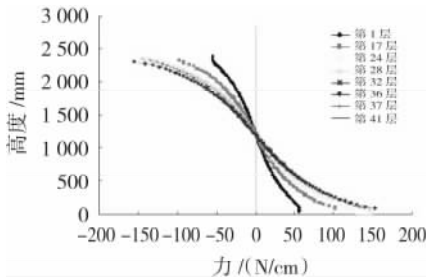


图 6 轴向瞬态电力分布

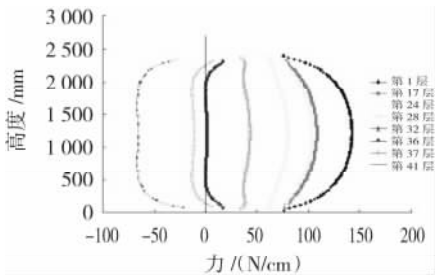


图 7 幅向瞬态电力分布

各层线圈轴向瞬态电力沿高度中心对称分布挤压电抗器,试图使其变矮.对于各线圈,端部位置电力大于中心位置电力.整体看,外层线圈的轴向瞬态电力大于内层线圈的轴向瞬态电力.这与各线圈端部以及外层线圈幅向磁通大相关.

各层线圈幅向瞬态电力以第 36 层线圈为中心挤压电抗器,试图使其变薄.第 36 层线圈幅向瞬态电力分布较均匀,距离第 36 层线圈越远,幅向瞬态电力的分布越不均匀.相同时刻时,第 1 层线圈在任意高度处的幅向瞬态电力都比其他线圈相同高度处的幅向瞬态电力大,中心高度处更明显.这与内部线圈轴向磁通大相关.

4.3 各包封瞬态电力的合力

各层线圈轴向电力合力为零,幅向电力合力较大.以包封为单位统计,幅向瞬态电力合力如表 2 所示.

第 1 ~ 14 包封幅向瞬态电力的合力方向由内向外,第 15 ~ 17 包封幅向瞬态电力的合力方向由外向内.各包封幅向瞬态电力分布极不均匀,内部包封幅向瞬态电力大小远大于外部包封幅向瞬态电力,第 1 个包封最大,第 15 个包封最小.

表 2 各包封幅向瞬态电力的合力

包封	幅向合力/kN	包封	幅向合力/kN	包封	幅向合力/kN
1	38.4	7	29.2	13	6.8
2	34.3	8	21.2	14	3.3
3	36.3	9	17.8	15	-0.67
4	32.7	10	15.3	16	-5.7
5	33.7	11	13.8	17	-10.7
6	33.8	12	10.4	—	—

5 瞬态电力对绝缘破坏性的讨论

5.1 最大压强核算

干式空心并联电抗器各层线圈并绕,各包封都包绕一定厚度的环氧玻璃丝,再整体固化.瞬态电动

力主要靠各包封自身约束。从数值计算结果看,各包封、各线圈瞬态电力的分布特性有较大差异:第17个包封端部轴向瞬态电力最大,第1个包封中心幅向瞬态电力最大。

轴向瞬态电力在线圈的线匝间产生挤压。第17个包封第41层线圈铝导线直径为3.6 mm,3股并绕,线圈内半径为1496 mm。核算41层端部1匝1股线圈轴向瞬态电力最大值为57 N,受力面为 0.0339 m^2 ,线匝间瞬态最大压强为 0.00168 MPa 。这一压强非常小,可以认为没有破坏性。

幅向电力对线圈的线匝形成膨胀或者收缩力,靠铝导线和环氧玻璃丝来约束。第1个包封内部有3层线圈,环氧玻璃丝在3层线圈内外表面缠绕,在端部密封。各层线圈都3股并绕,铝导线直径为2.3 mm,内层线圈内半径为994 mm,内外表面包绕的环氧玻璃丝厚度都为2 mm。第1个包封内各层线圈额定电流几乎没有差异,幅向电力大小基本相同。第1层线圈在中间高度处,1股线匝幅向电力最大值为40.27 N,单根铝导线约束力有效面积为 4.15 mm^2 ,1股线匝高度对应的单面环氧玻璃丝约束力有效面积为 4.6 mm^2 。如果由铝线匝约束幅向电力,则线匝承受的最大压强为9.7 MPa;如果由单面绝缘约束同一高度3根导线形成的幅向电力,则绝缘承受的最大压强为26.4 MPa。

5.2 与材料力学性能的对比

不同材质的铝导线和环氧玻璃丝的力学性能有很大差异,常用材料的抗拉强度和伸长率的范围如表3^[1-13]。

第1~14包封幅向瞬态电力的合力方向由内向外,第15~17包封幅向瞬态电力的合力方向由外向内。各包封幅向瞬态电力分布极不均匀,内部包封幅向瞬态电力大小远大于外部包封幅向瞬态电力,第1个包封最大,第15个包封最小。

表3 两种材料的力学特性

材料	抗拉强度/MPa	伸长率/%
铝导线	80~200	3~30
环氧玻璃丝	300~800	2~5

X环氧玻璃丝在线圈内外表面缠绕,第1包封幅向瞬态电力为膨胀力,则对包封外表面绝缘产生压力,对内表面绝缘产生拉力。导线匝绝缘一般为聚酯薄膜,如果聚酯薄膜和环氧玻璃丝两种材料粘接不牢固,粘接面的抗拉强度会下降。在瞬态电力作用下,会出现线圈与表面绝缘脱层,包封内表面绝

缘不受力。由于导线和外表面绝缘受力后产生伸展,与内表面绝缘间产生缝隙,它们之间的作用力会集中在端部绝缘,由表2可看出,包封幅向瞬态电力的合力非常大,若该合力部分作用于端部,其整体拉伸力会使端部绝缘开裂。

6 结 论

通过对一台BKDK-20000/35型干式空心并联电抗器的瞬态电力进行核算,得到如下结论:

- 1) 干式空心并联电抗器投入瞬态过电流会产生强瞬态电力。
- 2) 轴向瞬态电力和幅向瞬态电力分布都极不均匀。外层线圈的端部轴向瞬态电力最大,内层线圈中心幅向瞬态电力最大。
- 3) 轴向瞬态电力对绝缘的破坏性可以忽略,幅向瞬态电力对绝缘具有一定的破坏性。线圈与表面绝缘脱层,造成端部绝缘受力集中是造成绝缘开裂的原因。
- 4) 电抗器制造过程要注重各包封线圈与外表面绝缘的粘接程度,避免脱层现象出现。

参 考 文 献:

- [1] 陈梁金,周国梁,江少成. 35kV 空母线系统中真空断路器投切电抗器相关问题分析 [J]. 高压电器,2010,46(9):103-105.
- [2] 夏长根. 一起35 kV 干式并联空心电抗器故障分析 [J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(5):9-11.
- [3] 刘让雄,杨春江,杨嗣光. 电容补偿装置中电抗器烧毁原因与保护措施 [J]. 高电压技术,1999,25(3):17-21.
- [4] 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.
- [5] 聂喜玲,黎大健,赵坚. 干式空心电抗器损坏原因分析及对策 [J]. 广西电力,2013,36(2):29-31.
- [6] 王耀龙. 干式空心并联电抗器多起损坏原因分析 [J]. 电气技术,2012,(7):55-57.
- [7] 倪学锋,林浩,沈静,等. 干式并联电抗器包封进水对运行可靠性影响的试验研究 [J]. 电力设备,2006,7(12):4-6.
- [8] 刘志刚,王建华,耿英三,等. 干式空心电抗器磁场和电感的计算分析 [J]. 高压电器,2003,39(3):7-11.
- [9] 牛艳艳,刘志刚,耿英三,等. 空心电抗器在瞬变中的电力计算 [J]. 电气开关,2004,5(4):20-23.
- [10] 赵延山. 空心电抗器电场及电力问题 [J]. 山东大学,2012.
- [11] 欧阳国恩,孙其海,林凤森,等. 碳纤维/环氧树脂冲击性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料,2003,(4):6-33.
- [12] 廖子龙,乌云其其格. 环氧树脂/玻璃纤维复合材料性能研究与应用 [J]. 工程塑料应用,2008,36(9):47-49.
- [13] 王强,吴细毛,李春和,等. 拉拔工艺对A6工业纯铝导线力学性能的影响 [J]. 材料研究学报,2013,27(3):231-236.

(编辑: 关 毅)