

变压器式可控电抗器的磁场和参数计算

田铭兴, 励庆孚

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用场路耦合的有限元似稳电磁场分析方法, 对只有一个控制绕组的变压器式可控电抗器在不同负载下的稳态磁场进行了分析, 推导了磁场和参数的计算公式, 确定了与控制绕组交链方向相反的两部分磁通的分界线位置, 给出了解析计算参数与有限元数值分析结果的比较, 说明两者具有很好的一致性。

关键词: 可控电抗器; 变压器式; 磁场分析; 参数计算

中图分类号: TM554 文献标识码: A 文章编号: 0253-987X(2005)06-0656-03

Calculation of Magnetic Flux and Parameters of Reactor of Transformer Type

Tian Mingxing, Li Qingfu

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

变压器式可控并联电抗器(CSRT)^[1-3]的基本工作原理类似于短路电压为 100% 的变压器。文献[4]采用传统变压器的分析方法计算了 CSRT 的参数, 但缺乏电磁场分析的支持和系统性。本文通过场路耦合的有限元方法对 CSRT 的电磁场进行了详细分析。

1 CSRT 的磁场分布

图 1 为只有一个控制绕组的 CSRT。采用二位场路耦合电磁场有限元法分析可得磁场分布如图 2

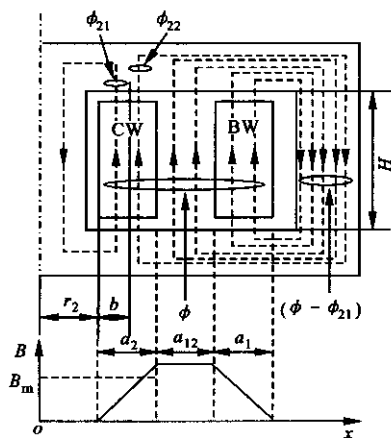


图 1 CSRT 的结构和计算示意图

~图 4 所示。由图 2~图 4 可以看出, 空载时, CW 开路, 磁通全部从铁心和轭部通过, 此时绕组中只有很少的空载激磁电流。随着 CW 中电流的增大, 磁通近似与 CW 电流成比例地由铁心柱中向铁芯柱外

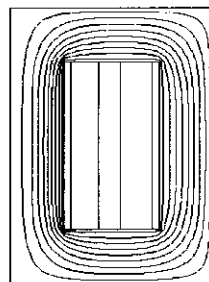


图 2 空载时的磁场分布

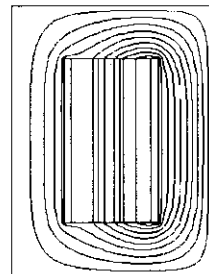


图 3 1/2 负载时的磁场分布

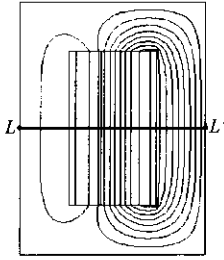


图4 额定负载时的磁场分布

的空气中转移.当CW通过额定电流时,磁通几乎全部从铁心外部的空气中通过.但是,由于BW所加电压始终是额定电压,所以与BW交链的磁链保持不变.

2 CSRT的磁场计算

如图1所示,磁通 ϕ_{21} 与CW的磁链为

$$\varphi_{21} = \int_0^b 2\pi(r_2 + x) \frac{x}{a_2} B_m \frac{x}{a_2} W dx \quad (1)$$

磁通 ϕ_{22} 与CW的磁链为

$$\varphi_{22} = \int_b^{a_2} 2\pi(r_2 + x) \frac{x}{a_2} B_m \frac{a_2 - x}{a_2} W dx \quad (2)$$

式中: b 表示了方向相反的磁通 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 的分界线位置(图1),且 $0 \leq b \leq b_0 < a_2$,当 $\varphi_{21} = \varphi_{22}$ 时, b 记作 b_0 .设CW折算后的电阻为 R_2 ,短路电流为 I_N ,则当CW短路时有

$$4.44f\varphi_{22} - 4.44f\varphi_{21} = R_2 I_N \quad (3)$$

由式(1)~式(3)得

$$\varphi_{21} = \Delta\varphi_2 - \frac{R_2 I_N}{4.44fW} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_2 &= \pi B_m (d_{12} - a_{12} - a_2) \frac{a_2}{6} \\ \varphi_{21} &= \int_0^b 2\pi(r_2 + x) \frac{x}{a_2} B_m dx \quad (5) \end{aligned}$$

$$d_{12} = 2(r_2 + a_2 + a_{12})/2$$

设 $R_2 I_N \approx 0$,则

$$\int_0^b 2\pi(r_2 + x) \frac{x}{a_2} B_m dx = \pi B_m (d_{12} - a_{12} - a_2) \frac{a_2}{6} \quad (6)$$

求解式(6)就得到了忽略CW电阻压降时的 b ,记为 b_0 .如把有关参数代入式(6),可得 $b_0 = 11.779$ cm.在图4中取一路径 $L-L'$,使之处于磁场的1/2高度,画出 $L-L'$ 上 z 方向的矢量磁位,如图5所示,显然图中曲线过零点就是图1中的方向相反的磁通 ϕ_{21} 和 ϕ_{22} 的分界线位置,可见代数方程和有限元分析

所得结果非常接近.

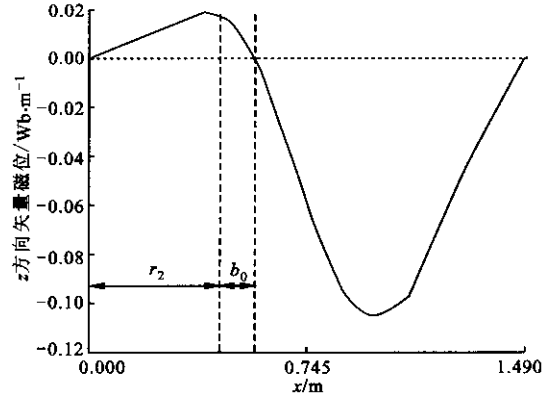


图5 额定负载时 $L-L'$ 上的矢量磁位

3 CSRT的参数计算

空载磁通为

$$\begin{aligned} \phi_0 &= B_m \pi \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{a_1 - a_2}{3} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) + \frac{R_2 I_N}{4.44fW} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

分布于BW、CW之间以及它们自身所占空间中的总磁通为

$$\begin{aligned} \phi &= B_m \pi \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{a_1 - a_2}{2} \left(a_{12} + \frac{2(a_1 + a_2)}{3} \right) \right] \quad (8) \end{aligned}$$

由式(4)、式(8)可得

$$\begin{aligned} \phi - \phi_{21} &= B_m \pi \left[d_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{3} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{a_{12}}{2} \left(a_1 - \frac{2a_2}{3} \right) + \frac{1}{3} \left(a_1^2 - \frac{1}{2} a_2^2 \right) \right] + \frac{R_2 I_N}{4.44fW} \quad (9) \end{aligned}$$

另外,因为

$$\begin{aligned} B_m &= 2^{1/2} \mu_0 I_N W / H \\ U_{ph} &= 4.44fW B_m A_{1eq} \quad (10) \end{aligned}$$

所以,绕组匝数为

$$W = (U_{ph} H / 4.44(2)^{1/2} \mu_0 f I_N A_{1eq})^{1/2} \quad (11)$$

电抗器额定负载时的感抗(短路感抗)为

$$X_s = U_{ph} / I_N = 2\pi f \mu_0 W^2 A_{1eq} / H \quad (12)$$

表1为上述公式计算的空载磁通、额定负载磁

表1 计算结果比较

	公式计算	有限元计算
ϕ_0 /Wb	0.575 5	0.574 2
ϕ /Wb	0.711 0	0.712 6
$\phi - \phi_{21}$ /Wb	0.666 9	0.665 5
X_s/Ω	1 134.42	1 135.32

通以及短路感抗值与有限元数值计算值的比较,从中可以看出两者具有很好的一致性,额定负载时BW交链的磁通大于空载时交链的磁通。

4 结 论

通过改变控制绕组电流,CSRT的磁场分布发生了变化,从而使电抗器电流(容量)在很大范围内可以平滑控制。额定工况时,磁通集中在绕组之间以及它们自身所占有的空间中,铁芯中几乎没有磁通经过。CSRT与普通变压器的最大不同在于前者的短路电压为100%,即在任何负载工况下,工作绕组所加电压都是电网母线电压。文中有关磁场和参数的公式计算和有限元分析方法可以作为实际设计和

研究CSRT的参考。

参考文献:

- [1] Александров Г Н. Принципы работы управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа [J]. Электротехника, 1995, 66(11): 30-34.
- [2] Tian Mingxing, Li Qingfu, Li Qunfeng. A controllable reactor of transformer type [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2004, 19(4): 1 718-1 726.
- [3] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的限流电抗计算和仿真 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(8): 820-823.
- [4] Александров Г Н. К методике расчета управляемых шунтирующих реакторов трансформаторного тока [J]. Электричество, 1998(4): 15-20.

(编辑 杜秀杰)

(上接第619页)

(2) 对于一台才出厂或者运行不久的电力变压器来说,在油箱表面测得的绕组振动信号主要集中在100 Hz处,各次谐波成分被变压器油及油箱壁大大衰减,几乎接近于0。

(3) 在油箱表面测得的绕组振动信号的基频成分与流过绕组的负载电流的平方呈较好的线性关系,在评价绕组的振动水平时,必须考虑负载电流的大小。

当电网电压的波动有多大时须考虑其对铁心振动的影响,还需要结合振动法检测铁心故障的判据来决定,这将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] Lavalle J C. Failure detection in transformer using vibrational analysis [D]. Cambridge, USA: MIT, 1986.
- [2] Rusov V A. Monitoring clamping forces in windings and cores of large power transformers using their vibration characteristics [J]. Elektricheskie Stanzii, 1998(6): 52-57.
- [3] Sanz-Bobi M A, Garcia-Cerrada A, Palacios R, et al. Experiences learned from the on-line internal monitoring of the behavior of a transformer [A]. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, Piscataway, USA, 1997.
- [4] Berler Z, Golubev A, Rusov V, et al. Vibro-acoustic method of transformer clamping pressure monitoring [A]. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, 2000.
- [5] Chung C S, You C H, Yoon Y H, et al. Fault discrimination of power transformers using vibration signal analysis [A]. Integrating Dynamics Condition Monitoring and Controlling Conference 21st Century, Rotterdam, Holland, 1999.
- [6] 汲胜昌, 李彦明, 傅晨钊. 负载电流法在基于振动信号分析法监测变压器铁心状况中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 154-158.
- [7] 汲胜昌, 王世山, 李清泉, 等. 用振动信号分析法监测变压器绕组状况 [J]. 高电压技术, 2002, 28(4): 12-13.
- [8] Weiser B, Pfitzner H. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(5): 3 759-3 777.
- [9] 宛德福. 磁性理论及其应用 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.
- [10] Weiner M M. Magnetostrictive offset and noise in flux gate magnetometers [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1969, 5(2): 98-105.
- [11] 汲胜昌, 刘味果, 单平, 等. 变压器铁心及绕组状况的振动测试系统 [J]. 高电压技术, 2000, 26(6): 1-3.
- [12] 顾晓安, 沈荣瀛, 徐基泰. 国外变压器噪声研究的动向 [J]. 变压器, 2002, 39(6): 33-38.
- [13] Bartoletti C, Desiderio M, Dicarolo D, et al. Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 221-229.

(编辑 杜秀杰)