

励磁前移等效法在大功率整流变压器仿真中的应用

赵道德¹, 曾秋生¹, 陈洁莲¹, 陈元初¹, 张士权²

(1. 株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 大唐国际再生资源开发有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010206)

摘要: 以某电解铝工程项目用 72 MVA 大功率整流变压器的铭牌数据计算为基础, 采用励磁前移等效法计算其仿真技术参数, 建立了 PSIM 仿真模型并进行了试验。仿真结果验证了该仿真模型的有效性和可用性。

关键词: 整流变压器; 励磁前移等效法; PSIM 仿真

中图分类号: TM422; TM401+.1

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)05-0017-04

Application of Excitation Forward Equivalent Method for High-power Rectifying Transformer

ZHAO Dao-de¹, ZENG Qiu-sheng¹, CHEN Jie-lian¹, CHEN Yuan-chu¹, ZHANG Shi-quan²

(1. Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Datang International Recycling Resource Development Co., Ltd., Huhhot, Inner Mongolia 010206, China)

Abstract: Taking the nameplate data of 72 MVA high power rectifying transformer used in an electrolytic aluminum project as an example, the PSIM simulation model is established and tested, which is on the basis of calculation of simulated technology parameters with an excitation forward equivalent method. Simulation results verify the validity and availability of the simulation model.

Key words: rectifying transformer; excitation forward equivalent method; PSIM simulation

0 引言

随着电化学及冶炼行业的发展, 大功率整流供电设备的设计越来越复杂。整流变压器, 作为大功率整流装置中的关键设备之一, 其现有仿真模型数据难以直接应用于实际铭牌数据的选择和大功率整流系统的设计中。采用励磁前移等效法并结合应用仿真系统中的变压器模型, 能依据变压器铭牌数据更准确地计算出变压器的仿真性能参数, 系统仿真结果的准确度更高, 与实际应用情况更接近, 仿真对实际应用的指导价值进一步提高。

1 大功率整流变压器原理

某电解铝工程项目, 其整流变压器容量为 72 MVA, 由调压变压器 T1 和整流主变压器 T2 各 1 台组成, 2 台变压器独立安装。调压变压器采用三绕组变压器结构, 联接组别为 Y/Y/, 其中: 第一和第二绕组均采用 Y 型联接, 第二绕组为调压绕组; 第三绕组为无功功率补偿绕组, 采用 型联接, 在仿真模型中忽略第三绕组。

整流主变压器采用等效 12 脉波双铁心结构, 实物为 2 台相移角为 30° 的 6 脉波整流变压器安装在同一器身内。其联接方式为 (+12°) Y/ 和 (+12°) / , 一次侧绕组分别为 Y 型和 型(均移相 +12°) 联接, 二次侧绕组均为同相逆并联形式、在整个铁心柱范围内交错排列。在后续仿真计算中, 忽略一次侧的移相绕组。

收稿日期: 2011-06-12

作者简介: 赵道德(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事变流技术的研究工作。

调压变压器及整流主变压器的铭牌数据如表1所示。

表1 变压器铭牌数据
Tab. 1 Nameplate data of transformer

参数	T 1				T 2			
	4 级	14 级	28 级	42 级	4 级	14 级	28 级	42 级
空载电流 $I_{0\%}$ / %	0.15	0.186	0.279	0.557	0.18	0.14	0.07	0.03
空载损耗 P_0 / kW	45.2	45.2	45.2	45.2	84.5	45.5	20.1	5.4
短路损耗 P_k / kW	289	309.1	280.9	247.5	273.9	273.9	273.9	273.9
短路阻抗 $Z_{k\%}$ / %	10.7	13.3	8.6	4.1	4.2	5.4	8.1	16
一次侧电压 U_1 / V	220000	220000	220000	220000	70000	56538	37692	18846
一次侧电流 I_1 / A	188.4	152.2	101.4	50.7	296.1	296.1	296.1	296.1
二次侧电压 U_2 / V	70000	56538	37692	18846	577	466	311	155
二次侧电流 I_2 / A	592.2	592.2	592.2	592.2	17952	17952	17952	17952

2 仿真参数计算

2.1 励磁前移等效法

由于大功率电力变压器的变比 k 值较大,使一次侧和二次侧的电压、电流及阻抗等数值相差大,因而分析计算既不方便也不精确,相量图更难画。为了避免这些问题,可采用一个既能准确反映变压器内部电磁过程又便于工程计算的等效电路来代替实际的变压器,通过绕组折算便可得到这种等效电路。对于双绕组变压器,其理想变压器模型等效电路图(即传统变压器的T型等效电路)如图1所示。图中, R_1 和 L_1 为一次侧绕组的电阻和电感, R_2 和 L_2 为二次侧绕组的电阻和电感, R_m 和 L_m 为励磁绕组的电阻和电感, R_2' 和 L_2' 为换算到一次侧的二次侧绕组的电阻和电感。

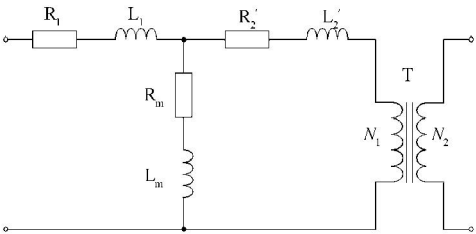


图1 T型等效电路图
Fig.1 T-type equivalent circuit

因变压器铭牌上短路阻抗和短路损耗等参数为一次侧和二次侧绕组的总数值,无法区分各绕组单独的参数数值。由于大功率变压器的励磁阻抗远大于一次和二次侧绕组的短路阻抗,可以将励磁回路向一次电源侧前移(图2),折算到一次侧的一次和二次侧短路阻抗就能按串联方式计算出变压器的短路总阻抗,则可依据短路阻抗和短路损耗等变压器总数值计算短路总阻抗值。变压器的这种近似等效电路方法即为励磁前移等效法,它同样适用于Matlab等其他仿真软件中。图2中 R_{t1} 和 L_{t1} 为折算到一次侧的变压器总电阻和总电感,

即 $R_{t1}=R_1+R_2', L_{t1}=L_1+L_2'$ 。以下大功率整流变压器参数计算时均采用折算到一次侧的技术数据。

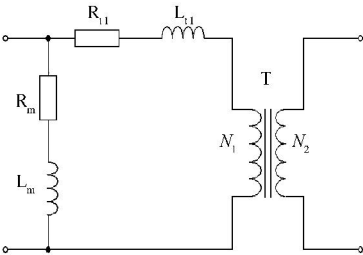


图2 励磁前移等效电路图
Fig.2 Excitation forward equivalent circuit

2.2 仿真参数计算

以某电解铝项目72MVA变压器为例,结合表1数据,取额定运行级数为4,采用励磁前移等效法计算调压变压器和整流主变压器的短路阻抗值和励磁阻抗值。调压变压器T1相关参数计算过程如下:

(1)励磁电阻:

$$R_{m1} = \frac{P_0}{3 \times (I_1 \times I_{0\%})} = \frac{45.2 \times 10^3}{3 \times (188.4 \times 0.15\%)^2} = 188.7 \text{ k}\Omega$$

(2)励磁阻抗:

$$Z_{m1} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \times (I_1 \times I_{0\%})} = \frac{220 \times 10^3}{3 \times (188.4 \times 0.15\%)^2} = 449.5 \text{ k}\Omega$$

(3)励磁电抗:

$$X_{m1} = \sqrt{Z_{m1}^2 - R_{m1}^2} = \sqrt{(449.5 \times 10^3)^2 - (188.7 \times 10^3)^2} = 408 \text{ k}\Omega$$

(4)励磁电感:

$$L_{m1} = \frac{X_{m1}}{2\pi f} = \frac{408 \times 10^3}{2\pi \times 50} = 1299 \text{ H}$$

(5)短路电阻:

$$R_{t11} = \frac{P_k - P_0 \times Z_{k\%}^2}{3I_1^2} = \frac{289 \times 10^3 - 45.2 \times 10^3 \times 0.107^2}{3 \times 188.4^2} = 2.709 \text{ }\Omega$$

(6)短路测试阻抗:

$$Z_{k11} = \frac{U_1 \times Z_{k\%}}{\sqrt{3} \times I_1} = \frac{220 \times 10^3 \times 10.7\%}{\sqrt{3} \times 188.4} = 72.14 \text{ }\Omega$$

(7)短路阻抗:

$$Z_{t11} = \frac{Z_{m1} \times Z_{k11}}{Z_{m1} - Z_{k11}} = \frac{449.5 \times 10^3 \times 72.14}{449.5 \times 10^3 - 72.14} = 72.15 \text{ }\Omega$$

(8)短路电抗:

$$X_{t11} = \sqrt{Z_{t11}^2 - R_{t11}^2} = \sqrt{72.15^2 - 2.709^2} = 72.1 \text{ }\Omega$$

(9)短路电感:

$$L_{t11} = \frac{X_{t11}}{2\pi f} = \frac{72.10}{2\pi \times 50} = 229.6 \text{ mH}$$

参照T1的励磁前移等效法推导过程,同理可计算

出整流变压器各特征调压级数处的励磁阻抗和短路阻抗(表2)。

表2 整流变压器阻抗计算结果
Tab.2 Impedance calculation results of rectifier transformer

变压器类型	参数	4级	14级	28级	42级
T1	励磁电阻 $R_{m1}/k\Omega$	188.7	188.7	188.7	188.7
	励磁电感 L_{m1}/H	1299	1299	1299	1299
	短路电阻 R_{t11}/Ω	2.709	4.436	9.096	32.09
	短路电感 L_{t11}/mH	229.6	353.3	341.9	310.8
T2	励磁电阻 $R_{m2}/k\Omega$	49.58	44.13	77.98	114.1
	励磁电感 L_{m2}/H	182.7	207.7	223.9	142.3
	短路电阻 $R_{t12}/m\Omega$	520.4	520.4	520.4	520.4
	短路电感 L_{t12}/mH	18.18	18.89	18.89	18.65

注：计算励磁阻抗和短路阻抗的满足条件分别为 $P_0 < I_0\% < S_1$ 和 $P_k < Z_k\% < S_1$ ，其中 S_1 为变压器一次侧容量。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

根据励磁前移等效法计算出变压器相关参数，采用电力电子仿真软件PSIM搭建了整流变压器模型(图3)。图中，T1为调压变压器模型(忽略补偿绕组)，T2与T3合并称之为整流主变压器模型(忽略移相绕组)。T2和T3联接方式分别为Y/ 和 / ，在模型中将T2二次侧的2个绕组合并为一个绕组，这样整流主变压器的仿真模型简化为常规的双绕组变压器。在整流主变压器的计算与仿真时，均以变压器T2为例。

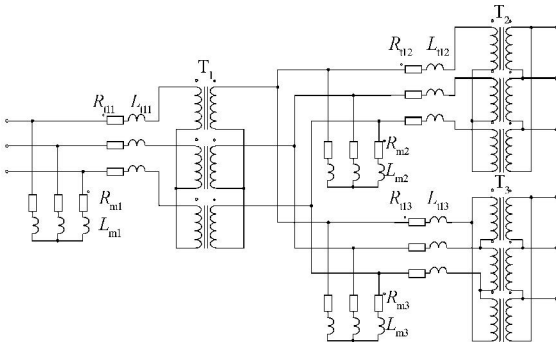


图3 整流变压器仿真模型
Fig.3 Simulation model of rectifying transformer

由于整流主变压器二次侧的同相逆并联绕组在整个铁心柱轴向范围内交错排列，其间的漏阻抗接近于零(二次侧阻抗可全归算到一次侧)，则两绕组带公共负载或在公共侧短路时，将平均分配总的负载电流和短路电流；只有其中一个绕组带公共负载或短路时，另一绕组视同于开路，该绕组的负载电流和短路电流将达到两绕组同时带载或同时短路时通过该绕组电流的2倍(理论最大值)。该模型亦适用于具有同样电磁结构的同相非逆并联二次绕组的整流变压器。以调压变

器T1为例，使用PSIM软件设计了变压器3种不同工作状态(空载、短路和额定负载)的仿真试验模型图，其中额定负载试验模型如图4所示。整流主变压器T2试验模型与调压变压器T1的类似，故省略。

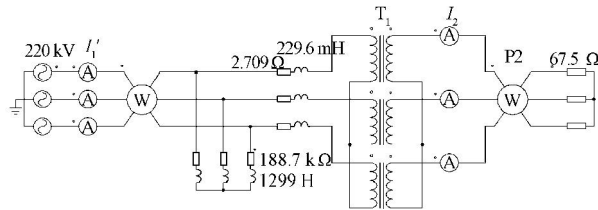


图4 调压变压器额定负载试验模型图
Fig.4 Rated load test model of voltage adjusting transformer

3.2 仿真结果

图5和图6分别示出级数为4时调压变压器和主变压器的3种试验仿真结果。表3和表4提供了整流变压器的仿真试验结果及其铭牌数据的对比。可以看出，采用励磁前移等效法计算出的仿真参数应用于PSIM仿真模型中，其结果与实际结果的最大误差率为3.8%，表明仿真结果与实际应用情况基本符合。

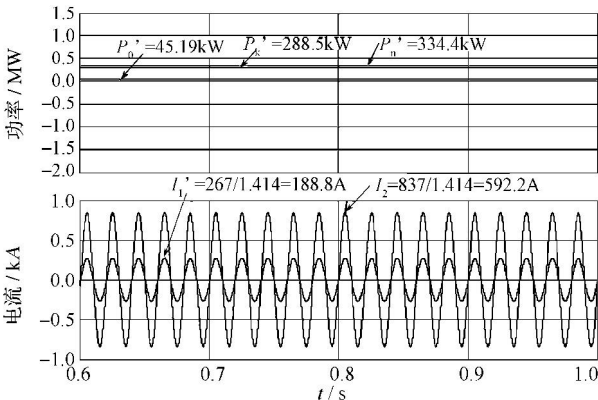


图5 (级数4) 调压变压器T1 仿真波形
Fig.5 Simulation waveforms of voltage adjusting transformer T1 (level 4)

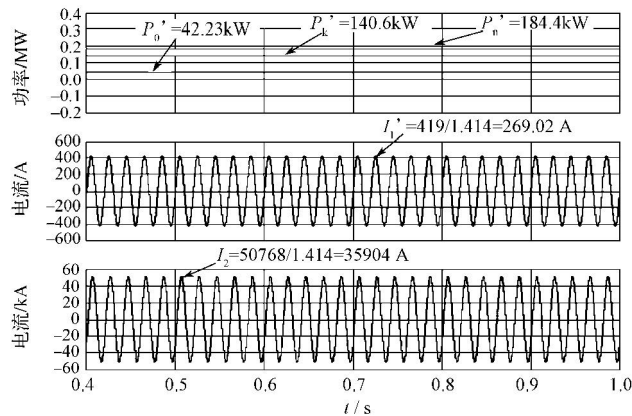


图6 (级数4) 整流主变压器T2 仿真波形
Fig.6 Simulation waveforms of rectifier main transformer T2(level 4)

表3 调压变压器T1 仿真结果及其铭牌数据对比

Tab. 3 Comparison between simulation data and nameplate data for voltage adjusting transformer T1

序号		参数 (表 2 数据 ×0.5)	4 级	14 级	28 级	42 级	仿真试验条件
1	空 载	实际空载损耗 P_0 / kW	45.2	45.2	45.2	45.2	$U_1=220 \text{ kV}; I_2=0$
2		仿真空载损耗 P_0' / kW	45.19	45.17	45.18	45.18	
3		空载损耗误差率 / %	0.02	0.07	0.04	0.04	
4	短 路	实际短路损耗 P_k / kW	289	309.1	280.9	247.5	$U_k=Z_{k\%} \times 220 \text{ kV};$ $R_2=0;$ $Z_{k\%}$ 按表 1 取值
5		仿真短路损耗 P_k' / kW	288.5	308.6	280.5	247.2	
6		短路损耗误差率 / %	0.17	0.16	0.14	0.12	
7	额 定 负 载	实际额定损耗 P_n / kW	334.2	354.3	326.1	292.7	$U_1=220 \text{ kV};$ $I_2=592.2 \text{ A}$
8		仿真额定损耗 P_n' / kW	334.4	353.9	326.0	293.6	
9		额定损耗误差率 / %	0.06	0.11	0.03	0.31	
10		实际额定电流 I_1 / A	188.4	152.2	101.4	50.7	
11		仿真额定电流 I_1' / A	188.8	152.5	101.6	50.93	
12		一次侧电流误差率 / %	0.21	0.20	0.20	0.45	

表4 整流主变压器T2 仿真结果数据对比

Tab.4 Comparison between simulation data and nameplate data for rectifying main transformer T2

序号		参数 (表 2 数据 ×0.5)	4 级	14 级	28 级	42 级	仿真试验条件
1	空 载	实际空载损耗 P_0 / kW	42.25	22.75	10.05	2.70	U_1 按表 1 取值; $I_2=0$
2		仿真空载损耗 P_0' / kW	42.23	22.73	10.045	2.699	
3		空载损耗误差率 / %	0.05	0.09	0.05	0.04	
4	短 路	实际短路损耗 P_k / kW	136.95	136.95	136.95	136.95	$U_k=Z_{k\%} \times 220 \text{ kV};$ $R_2=0;$ $Z_{k\%}$ 和 U_1 按表 1 取值
5		仿真短路损耗 P_k' / kW	140.6	140.5	140.5	140.6	
6		短路损耗误差率 / %	2.7	2.6	2.6	2.7	
7	额 定 负 载	实际额定损耗 P_n / kW	179.2	159.7	147	139.65	U_1 按表 1 取值; $I_2=35\ 904 \text{ A}$
8		仿真额定损耗 P_n' / kW	184.4	165.1	152.6	144.4	
9		额定损耗误差率 / %	2.9	3.4	3.8	3.4	
10		实际额定电流 I_1 / A	296.1	296.1	296.1	296.1	
11		仿真额定电流 I_1' / A	296.02	295.95	296.16	295.17	
12		一次侧电流误差率 / %	0.03	0.05	0.02	0.31	

4 结语

本文介绍了一种用于变压器仿真参数计算的励磁前移等效法,用该方法计算的仿真参数与实际铭牌参数基本一致。以励磁前移等效法建立的大功率整流变压器PSIM 仿真模型可用于现代电化学和冶金等行业所用的复杂大功率整流变压器仿真分析中,完全可用于实际工程定量分析,对实际应用有一定的指导价值。

参考文献:

[1] Powersim Inc. PSIM User's Guide [S]. Version 6.0. Powersim Inc,

2003.

[2] 沈阳铝镁设计研究院电力室. 硅整流所电力设计[M]. 北京: 冶金工业出版社,1983.

[3] 王兆安,张明勋. 电力电子设备设计 and 应用手册[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社,2009.

[4] 崔立君. 特种变压器的理论与设计[M]. 北京: 科学技术文献出版社,1995.

[5] 路长柏. 电力变压器的理论与计算[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社,2007.

[6] 王希平,李文才,李燕,等. 基于 Simulink 配电变压器模型的建立及仿真[J]. 自动化技术与应用,2009,28(9):124-126,132.

欢迎订阅 2012 年《大功率变流技术》

双月刊CN:43-1486/U

国内订阅处:全国各地邮局

邮发代号:42-337