

谐波激励下变压器铜屏蔽杂散损耗的计算和验证

赵志刚,尹赛宁,郭莹,刘佳,杨凯

(河北工业大学 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室,天津 300130)

摘要:通过参考 IEC61378-2 标准提供的换流变压器谐波损耗计算方法,得出计算变压器铜屏蔽杂散损耗的解析公式。基于 P21°-EM1 简化模型,采用一种新的杂散损耗测量方法,即通过模型总损耗测量值减去模型激励线圈损耗的精确仿真值得到结构件中的损耗,以此作为实验值,对解析公式计算的结果进行验证。结果表明:铜板的基波损耗计算结果与实验值基本一致;基波叠加多次谐波激励下的铜板损耗与各次谐波单独激励下的铜板损耗之和大致相同;在激励电流频率相同的情况下,铜板杂散损耗与电流大小的平方满足一定的比例关系;在激励电流大小相同的情况下,铜板损耗与电流频率的 0.8 次方不满足 IEC 标准给出的频率特性。基于此,引入一个考虑磁场分布的修正因子对频率特性进行修正,通过修正结果与实验值的对比验证了修正因子的合理性。

关键词:变压器;铜屏蔽;谐波电流;杂散损耗;IEC61378-2;P21°-EM1 模型

中图分类号:TM 41

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.030

0 引言

随着我国高压直流输电(HVDC)系统的建立和发展,越来越多的电气设备将会受到谐波问题的影响,谐波磁场作用下电气设备的损耗、温升、噪音显著增加,影响其安全可靠运行^[1-4]。大型电磁设备中由铜板、铝板等非导磁材料制成的电磁屏蔽以及由导磁钢板组成的构件中杂散损耗的分布,在变压器设计中一直是研究的热点问题之一^[5-7]。因此,在电力变压器的设计中,准确预测或计算金属结构件的谐波杂散损耗,对提高变压器的运行效率以及避免局部过热具有重要的工程意义。

换流变压器是高压直流输电系统中的关键设备,运行时其负载电流中含有大量的高次谐波分量,并在金属结构件和绕组中产生谐波漏磁场与附加损耗。关于换流变压器谐波损耗的计算,有各种不同的方法^[8-9]。文献[10]对换流变压器金属构件和绕组中的谐波损耗进行了有限元仿真分析。目前工业中应用较为广泛的是 IEC61378-2 标准提供的谐波损耗计算方法,在计算金属结构件杂散损耗方面,该标准假定构件中的损耗与激励电流的 2 次方成正比,与频率的 0.8 次方成正比。然而,这 2 个假定是由工业换流变压器的经验测量数据得到的,并未考虑材料的非线性、导体的集肤深度等因素的影响。基于此,目前诸多专家学者展开了相关研究,文献[11-12]认为导体的涡流损耗与电流频率的 2 次方不成正比,并提出了一个考虑导体集肤效应和邻近效应的校正因子;文献[13]指出计算金属结构件损

耗时,应考虑材料特性,即将线性材料和非线性材料分开进行计算。杂散损耗计算方法的不准确性将直接影响变压器温升计算及其可靠性,因此在谐波激励条件下对 IEC61378-2 标准提供的铜屏蔽杂散损耗计算方法的有效性进行验证是十分必要的。

本文基于 P21°-EM1 简化模型,考虑到杂散损耗测量技术的难点在于无法将被试构件中的损耗从所测得的总损耗中分离,先通过实验测量得到模型的总损耗,再借助有限元仿真软件计算出模型激励线圈的损耗,通过两者作差间接得到铜板损耗,并以此作为实验值,最后对 IEC61378-2 标准提供的谐波杂散损耗计算方法进行验证分析。

1 实验模型及参数

本文对大型变压器油箱中普遍采用的铜屏蔽,由高次谐波漏磁通在其中感应产生的损耗进行解析计算与实验验证。实验模型见附录中图 A1。

实验模型是基于 TEAM21 基准族中 P21°-EM1 的简化模型,即 P21°-EM1 模型中去除导磁钢板,只剩下矩形铜板,其他结构参数不变,P21°-EM1 的尺寸结构图见附录中图 A2。本实验模型中铜板的尺寸为 520 mm×360 mm×5 mm。激励线圈由 2 个规格相同的线圈构成,匝数为 300,铜线为扁导线,其截面尺寸为 13.4 mm²。实验研究中模型的激励方式为反向激励,即模型中的 2 个激励线圈通入电流的大小相等,方向相反。

2 谐波杂散损耗的测量

2.1 模型总损耗的测量

本文采用如图 1 所示的实验系统对不同谐波电流激励下模型的总损耗进行测量。信号发生器与功率放大器共同构成了整个测试系统的电源部分,实

收稿日期:2018-05-05;修回日期:2019-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677052)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677052)

验时由信号发生器产生所需要的谐波信号,该谐波信号由功率放大器放大后为实验模型的线圈提供励磁电压与励磁电流,待电压稳定后,采用精密功率分析仪测量模型的电压、电流与有功损耗。

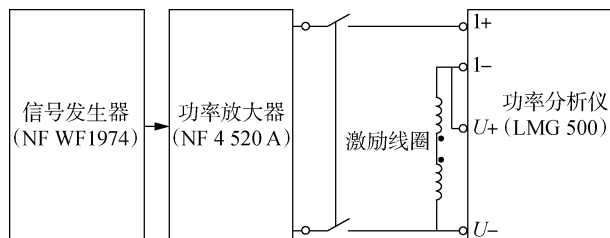


图1 实验电路

Fig.1 Experiment circuit

变压器金属结构件三维杂散损耗测量技术的难点在于无法将被试构件中的损耗从所测得的总损耗中分离,如果将被试构件从测量装置中移去,则线圈漏磁场分布将发生改变,从而导致线圈中的涡流损耗发生变化。传统的测量方法是用模型的负载损耗测量值减去空载损耗测量值得到结构件中的损耗,这只是一近似的测量方法,测量误差不可避免。负载与空载工况下实验测量示意图见附录中图A3。

由于铜板的导电性能良好,高次谐波漏磁通在铜板中感应的涡流效应较强,涡流对磁场的反作用非常明显,采用传统的测量方法得到模型中铜板的损耗误差较大。图2给出了激励电流为10 A、频率为150 Hz时模型在空载与负载工况下的二维磁通分布。从图2中可以看出,模型在空载与负载工况下线圈空间分布发生了很大的变化。

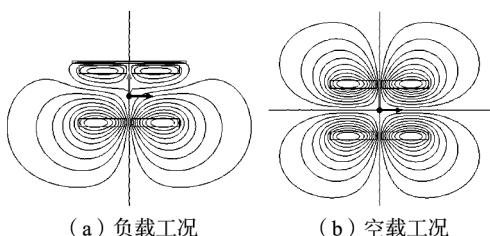


图2 二维磁通分布

Fig.2 Two-dimensional magnetic flux distribution

基于此,为了较为准确地获得在高次谐波激励下实验模型中铜板的损耗,考虑到负载工况下无法通过实验直接测量出激励线圈中的损耗(包括激励线圈电阻损耗和涡流损耗),本文利用负载工况下模型总损耗的测量值减去对应工况下激励线圈损耗的计算值来确定不同激励条件下结构件中的杂散损耗^[14],并以此作为本文的实验值。

2.2 激励线圈损耗的计算

总损耗的测量值由上述实验系统进行实验得到,负载线圈损耗的计算值则通过有限元软件(MagNet)进行三维建模和数值仿真得到。为准确计算出负载工况下励磁线圈的绕组损耗,本文严格按照实

际结构和尺寸进行精细化建模,考虑了模型的对称性后在MagNet软件中建立的1/4有限元仿真模型如图3所示。同时考虑了导体的集肤效应对线圈模型进行剖分,集肤深度 d 由式(1)确定。

$$d = 1/\sqrt{\pi f \sigma \mu} \quad (1)$$

其中, f 为激励电流的频率; σ 为材料的电导率; μ 为材料的磁导率。依据集肤深度的大小设置网格最大尺寸对激励线圈模型进行剖分,图4给出了激励线圈的网格划分示例图(网格最大尺寸为3 mm)。

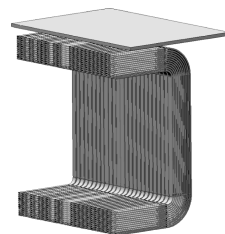


图3 P21°-EM1模型的1/4三维仿真模型

Fig.3 Quarter three-dimensional simulation model of P21°-EM1 model

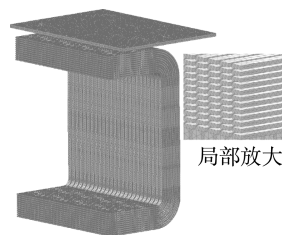


图4 有限元网格划分

Fig.4 Finite element meshing

仿真时激励线圈的材料属性如下:材料为铜,密度为 $8\,900\text{ kg/m}^3$,电导率为 $5.714\,3 \times 10^7\text{ S/m}$,相对磁导率为1。铜板与激励线圈的材料属性相同。

3 谐波杂散损耗的计算

通过参考IEC61378-2标准提供的工程近似计算换流变压器谐波损耗的方法,得出计算变压器铜屏蔽在基波叠加高次谐波非正弦激励下杂散损耗以及各次谐波激励下杂散损耗的解析公式分别如式(2)和式(3)所示。

$$P_{se} = \sum P_{seh} \quad (2)$$

$$P_{seh} = P_{se1} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^{0.8} \quad (3)$$

其中, P_{se} 为基波叠加高次谐波共同激励下结构件的杂散损耗; P_{seh} 为 h 次谐波单独激励时结构件的杂散损耗; P_{se1} 为基波(50 Hz)激励下结构件的杂散损耗; I_h 为 h 次谐波电流有效值; I_1 为基波(工频)电流有效值; f_h 为 h 次谐波电流的频率; f_1 为基波电流的频率(50 Hz)。

IEC61378-2 标准认为基波叠加高次谐波共同激励下金属结构件中的总损耗等于各次谐波单独激励下结构件的损耗之和。由于变压器金属结构件的材料根据磁导率的不同大致可分为 2 种:线性材料(非导磁材料,相对磁导率为 1)和非线性材料(导磁材料,磁导率不是一个常数)。对于线性和非线性这 2 种构件材料,基波叠加高次谐波下结构件的总损耗是否都可采用这种线性叠加法进行计算,需要进行进一步的验证。

对于 h 次谐波单独激励时金属构件的杂散损耗 $P_{se,h}$,该 IEC 标准认为, $P_{se,h}$ 满足一定的电流特性和频率特性。电流特性:激励电流频率相同时,与电流大小的平方成正比,如式(4)所示。

$$\frac{P_{se,x}}{P_{se,y}} = \left(\frac{I_x}{I_y} \right)^2 \quad (4)$$

其中, $P_{se,x}$ 和 $P_{se,y}$ 分别为电流大小是 I_x 和 I_y 时对应的杂散损耗。

频率特性:激励电流大小相同时,与电流频率的 0.8 次方成正比,如式(5)所示。计算变压器铜屏蔽的谐波损耗,这 2 种特性是否合理,本文将通过实验值进行验证。

$$\frac{P_{se,h}}{P_{se,1}} = \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^{0.8} \quad (5)$$

针对基波电流激励下金属结构件的杂散损耗 $P_{se,1}$,IEC61378-2 标准给出了一种计算方法。该标准指出换流变压器的负载损耗主要由绕组的电阻损耗、绕组的涡流损耗以及结构件的杂散损耗三部分构成。假定绕组中的涡流损耗与频率的平方成正比,金属构件中的杂散损耗与频率的 0.8 次方成正比,然后通过实验分别测量得到 2 种频率(工频 f_1 和倍频 f_x)激励下的负载总损耗,再利用式(6)计算出基波电流激励下金属结构件的杂散损耗。

$$\begin{cases} P_1 = R_{dc} I_1^2 + P_{we,1} + P_{se,1} \\ P_x = R_{dc} I_x^2 + \left(\frac{I_x}{I_1} \right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1} \right)^2 P_{we,1} + \left(\frac{I_x}{I_1} \right)^2 \left(\frac{f_x}{f_1} \right)^{0.8} P_{se,1} \end{cases} \quad (6)$$

其中, P_1 为工频下的负载损耗; P_x 为倍频下的负载损耗; R_{dc} 为绕组的直流电阻; $P_{we,1}$ 为工频下绕组中的涡流损耗; $P_{se,1}$ 为工频下结构件中的杂散损耗; I_x 为倍频激励下电流的有效值, I_x 需为 I_1 的 10%~50%; f_x 为倍频(不小于 150 Hz)。计算变压器铜屏蔽的基波杂散损耗,该标准给出的方法是否适用,本文将通过实验进行验证。

4 仿真和实验分析

为了验证通过三维建模和数值仿真可以准确计算出模型激励线圈中的损耗的有效性,本文首先对实验模型的总损耗(包括激励线圈损耗和铜板损

耗)进行了仿真计算与实验测量。表 1 给出了各次谐波电流激励下总损耗的仿真结果与实验值的对比(激励电流有效值均为 2 A,基波频率为 50 Hz)。

表 1 各次谐波下总损耗的仿真与实验结果

Table 1 Simulative and experimental results of total loss under various harmonics

谐波次数	仿真值/W	实验值/W
1	3.50	3.57
3	4.38	4.55
5	5.92	6.17
7	8.08	8.49
9	10.76	11.40
11	13.96	14.83

从表 1 中可以看出,在各次谐波电流激励下,模型总损耗的仿真值与实验值基本相同,说明了本文三维建模以及仿真方法的正确性。

4.1 基波杂散损耗的计算与验证

基于 IEC 标准提供的计算方法(式(6))以及上述实验手段,对基波电流激励下铜板损耗进行了解析计算与实验验证,计算与测量结果如表 2 所示。

表 2 铜板基波损耗的计算结果

Table 2 Calculative results of copper plate loss under fundamental wave

电流/A	测量值/W			计算值/W
	总损耗	线圈损耗	铜板损耗	
5	22.42	18.56	3.86	3.84
10	90.52	74.24	16.28	16.59
20	363.84	296.95	66.89	68.34

从表 2 中可以看出,铜板基波杂散损耗的计算结果与测量结果基本一致,从而通过实验证明了 IEC61378-2 标准提供的基波杂散损耗计算方法的准确性。

4.2 谐波杂散损耗的计算与验证

基于上述实验方法,分别在各次谐波与基波叠加多次(1+2+3+4+5)谐波电流激励下,对实验模型的总损耗进行了实验研究,测量结果如表 3 所示(基波频率为 50 Hz,电流均为有效值)。基波叠加多次谐波电流波形如图 5 所示。

从表 3 中可以看出,基波叠加多次谐波激励下的总损耗与各次谐波单独激励下的损耗之和大致相同,说明了在基波叠加多次谐波激励下计算铜屏蔽

表 3 谐波激励下总损耗测量结果

Table 3 Measurement results of total loss under harmonic excitation

谐波次数	激励电流/A	总损耗/W
1	5	22.42
2	1	0.99
3	1	1.14
4	1	1.32
5	1	1.54
1+2+3+4+5	5.385	27.68

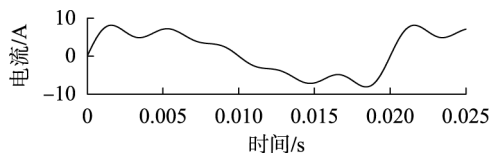


图5 电流波形

Fig.5 Waveform of current

的杂散损耗,IEC61378-2 标准给出的各次谐波损耗累加方法(式(2))的合理性。

基于上述实验方法,对 IEC 标准谐波损耗计算中的电流特性与频率特性(式(5))进行了实验研究。表4给出了3次谐波(150 Hz)单独激励时不同电流下铜板杂散损耗的实验结果与计算结果。计算结果是以电流是5 A时铜板损耗值为基准,其他电流下损耗值均以电流特性(式(4))计算而来。

表4 不同电流下铜板损耗的实验与计算结果

Table 4 Experimental and calculative results of copper plate loss under different currents

电流/A	实验值/W			计算值/W
	总损耗	线圈损耗	铜板损耗	
0.5	0.28	0.23	0.052	0.053
1	1.14	0.93	0.206	0.212
1.5	2.57	2.09	0.473	0.477
2	4.55	3.72	0.834	0.848
2.5	7.11	5.81	1.297	1.325
3	10.25	8.37	1.876	1.908
3.5	13.97	11.39	2.583	2.597
4	18.25	14.88	3.379	3.392
4.5	23.11	18.83	4.285	4.293
5	28.53	23.23	5.3	5.3

从表4中可以看出,相同电流下,以电流特性计算得到的铜板损耗与通过实验得到的铜板损耗值相差无几,由此可得:单次谐波激励下,铜板的杂散损耗满足 IEC61378-2 标准给出的电流特性。

图6给出了各次谐波(150~650 Hz)单独激励下铜板杂散损耗的实验结果与计算结果的对比(激励电流有效值均为2 A)。计算结果是以电流为2 A、频率为50 Hz下铜板损耗的实验值(0.59 W)为基准,其他频率下的损耗值均以频率特性(式(5))计算而来。

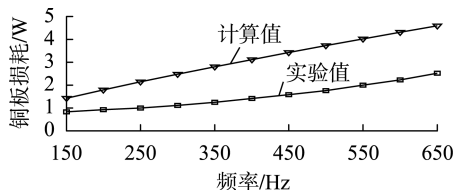


图6 各次谐波下铜板损耗的实验与计算结果

Fig.6 Experimental and calculative results of copper plate loss under various harmonics

从图6中可以看出,相同频率下,通过频率特性计算得到的铜板损耗与通过实验得到的铜板损耗值相差较大,计算值明显大于实验值,然而这并不意味

着频率特性的修正指数就要小于0.8,产生这样误差的原因可能是因为 IEC61378-2 标准给出的频率特性是由工业换流变压器测量数据得到的,没有考虑激励频率的变化给金属结构件中的磁通密度以及导体的集肤深度等因素带来的影响,要获得更加准确的计算结果需要进行更深入的研究。

4.3 频率特性的修正

基于 IEC61378-2 标准提供的谐波损耗计算方法,文献[15]提出了一个考虑磁场分布的适用于线性金属结构件的修正因子 $F(f_h)$,其最终形式如式(7)所示,本文引入该因子对原频率特性进行修正,修正公式如式(8)所示。

$$F(f_h) = \left(\frac{\sqrt{2}}{ka} \right)^2 \frac{\cosh(ka) - \cos(ka)}{\cosh(ka) + \cos(ka)} \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

$$P_{sch} = F(f_h) P_{sel} \left(\frac{f_h}{f_1} \right)^{0.8} \quad (8)$$

其中, a 为金属构件的厚度。

修正后的计算结果对比如图7所示。从图7中可以看出:一方面,当谐波频率为150~650 Hz时,与用 IEC 标准提供的计算方法得到的结果相比,用修正因子进行修正后得到的结果较趋近于实验结果,说明了该修正因子较为合理;另一方面,由于实验时受谐波电源功率的限制,无法测量出高于13次谐波下的模型损耗。在高于13次谐波激励下,铜板损耗的计算结果是否合理需要进行更深入的研究与验证,因此本文引入的频率特性修正因子也仅仅是工程计算变压器铜屏蔽损耗时的一个建议。

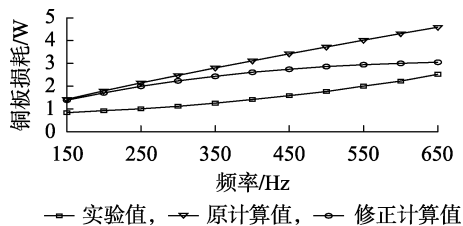


图7 各次谐波下铜板损耗对比

Fig.7 Comparison of copper plate loss under various harmonics

5 结论

a. 本文基于 P21°-EM1 简化模型,在不同谐波电流激励下,对模型中铜板损耗进行实验研究。基于实验结果,对 IEC61378-2 标准提供的谐波杂散损耗计算方法进行验证。通过计算值与实验结果的对比,可以看出基波损耗计算方法满足实际需要;基波叠加多次谐波下的损耗与对应的各次谐波损耗之和基本相同;谐波杂散损耗满足电流特性,但不满足频率特性,通过引入一个谐波损耗因子对频率特性进行修正,并将修正前、后的计算值与实验结果进行对

比,说明了修正因子在一定的谐波频率范围内的合理性。

b. 本文所得实验和计算结果,对谐波激励条件下变压器铜屏蔽等线性结构件的优化设计具有一定的指导意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵志刚,赵新丽,程志光,等. HVDC 中电力变压器直流偏磁屏蔽效应研究[J]. 电工技术学报,2014,29(7):45-52.
ZHAO Zhigang,ZHAO Xinli,CHENG Zhiguang, et al. Research on the shielding effects of power transformer under DC-biased condition in HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014,29(7):45-52.
- [2] 张良县,陈模生,彭宗仁,等. 非正弦负载电流下特高压换流变压器绕组的谐波损耗分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(15):2452-2459.
ZHANG Liangxian,CHEN Mosheng,PENG Zongren, et al. Study on the harmonic losses of UHV converter transformer winding subject to non-sinusoidal load current [J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(15):2452-2459.
- [3] 余光正,林涛,陈汝斯,等. 考虑智能配电网谐波谐振模式不确定性的抑制措施[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):60-66.
YU Guangzheng,LIN Tao,CHEN Rusi, et al. Harmonic resonance suppression considering harmonic resonance mode uncertainty of smart distribution grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(7):60-66.
- [4] 辛清明,黄莹,邱伟,等. 高压直流输电系统阻尼型双调谐交流滤波器的优化设计[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):218-223.
XIN Qingming,HUANG Ying,QIU Wei, et al. Optimal design of damping type double tuned AC filter in HVDC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(10):218-223.
- [5] 程志光,高桥则雄,博扎德·弗甘尼. 电气工程电磁热场的模拟与应用[M]. 北京:科学出版社,2009:247-293.
- [6] 程志光,刘涛,范亚娜,等. 基于 TEAM P21 三维杂散场问题建模仿真与验证[J]. 电工技术学报,2014,29(9):194-203.
CHENG Zhiguang,LIU Tao,FAN Yana, et al. TEAM P21-based validation of 3-D stray-field modeling and simulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(9):194-203.
- [7] 赵志刚,史文军,王振,等. 不同频率激励下变压器铜屏蔽中涡流损耗的研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(3):58-64.
ZHAO Zhigang,SHI Wenjun,WANG Zhen, et al. Research of eddy-current loss of copper shielding in transformer under different frequencies [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(3):58-64.
- [8] 李志广,沈湛,潘鹏,等. 基于集肤效应与邻近效应的静电除尘变压器绕组谐波损耗优化设计[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):141-147.
LI Zhiguang,SHEN Zhan,PAN Peng, et al. Harmonic loss optimization design of electrostatic precipitation transformer winding based on skin and proximity effects [J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(11):141-147.
- [9] 王瑞珍,文凯成,刘丰. 换流变压器谐波损耗确定方法的研究[J]. 湖北电力,2002,26(1):12-15.
WANG Ruizhen,WEN Kaicheng,LIU Feng. Study on the methods for the determination of harmonic loss on HVDC converter transformer [J]. Hubei Electric Power,2002,26(1):12-15.
- [10] 周伟,李岩,井永腾,等. 换流变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 高压电器,2012,48(8):18-23.
ZHOU Wei,LI Yan,JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of harmonic loss in converter transformer [J]. High Voltage Apparatus,2012,48(8):18-23.
- [11] MAKAROV S N,EMANUEL A E. Corrected harmonic loss factor for transformers supplying nonsinusoidal load currents [C] // International Conference on Harmonics & Quality of Power. Orlando, FL, USA: [s.n.], 2000:87-90.
- [12] ELMOUDI A,LEHTONEN M,NORDMAN H. Corrected winding eddy-current harmonic loss factor for transformers subject to nonsinusoidal load currents [C] // 2005 IEEE Russia Power Tech. St. Petersburg, Russia: IEEE,2005:1-6.
- [13] LIU Y,ZHANG D,LI Z, et al. Evaluation of the calculation method for stray losses in structural parts of HVDC converter transformers [C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Changsha, China: [s.n.], 2015:1780-1785.
- [14] 赵志刚,刘福贵,张晓晨,等. 一种确定交直流混合激励电磁构件杂散损耗的有效方法[J]. 电工技术学报,2017,32(2):95-101.
ZHAO Zhigang,LIU Fugui,ZHANG Xiaochen, et al. Confident determination of stray-field loss in electro-magnetic components under AC-DC hybrid excitation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(2):95-101.
- [15] LIU Y,ZHANG D,LI Z, et al. Study of the stray losses calculation in structural parts for HVDC converter transformers based on the TEAM problem 21 family [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016,31(2):605-612.

作者简介:



赵志刚

赵志刚(1981—),男,天津人,副教授,博士,研究方向为工程电磁场与磁技术;

尹赛宁(1993—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为现代电磁新技术(E-mail:287397097@qq.com);

郭莹(1993—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为现代电磁新技术;

刘佳(1994—),女,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为现代电磁新技术;

杨凯(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为电机设计与电磁技术。

(下转第223页 continued on page 223)

CHEN Jun, SI Hongjian, ZHOU Rongbin, et al. Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 167-171.

[12] 罗凌, 李振文, 宋兴荣. 大容量调相机继电保护配置方案研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(5): 26-30.

LUO Ling, LI Zhenwen, SONG Xingrong. Study on the relay protection scheme of high-capacity synchronous condenser[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(5): 26-30.

[13] 潘仁秋, 何其伟, 陈俊. 大型调相机的保护配置及其实现[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(6): 45-47.

PAN Renqiu, HE Qiwei, CHEN Jun. Implementation of protection configuration for large-scale synchronous compensator[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2011, 30(6): 45-47.

作者简介:



桑建斌

桑建斌(1986—),男,江苏无锡人,工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: sangjianbin7@126.com);

包明磊(1977—),男,浙江宁波人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统继电保护;

李玉平(1978—),男,湖南郴州人,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护。

Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser

SANG Jianbin¹, BAO Minglei¹, LI Yuping¹, WAN Luofei², LI Ming¹, ZHU Yucong¹

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2. NARI Group Corporation, Nanjing 210006, China)

Abstract: The start-up characteristics, operating characteristics and relay protection configuration scheme of 300 Mvar synchronous condenser that has been put into operation are introduced. The influence of the harmonic characteristics during the start-up process on the synchronous condenser protection is analyzed, based on which, the blocking logic of the synchronous condenser protection during the process of start-up and grid-connection operation is discussed, and the state blocking configuration of the synchronous condenser protection is proposed. In view of the importance of frequency tracking in the synchronous condenser protection, according to the harmonic characteristics and frequency conversion characteristics in the start-up process, the low-pass filtering and zero-crossing jitter discrimination are added in the frequency measurement methods. The simulation and experimental verification show that the zero-crossing frequency measurement after anti-interference processing can not only guarantee the accuracy and response speed, but also have good anti-interference performance.

Key words: synchronous condenser; relay protection; protection configuration; state blocking configuration; frequency tracking; zero-crossing frequency measurement; simulation

(上接第 216 页 continued from page 216)

Calculation and verification for stray loss of transformer copper shield under harmonic excitation

ZHAO Zhigang, YIN Saining, GUO Ying, LIU Jia, YANG Kai

(Province-Ministry Joint State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: By referring to the harmonic loss calculation method of converter transformer provided by IEC61378-2 standard, an analytical formula for calculating stray loss of transformer copper shield is obtained. Based on the simplified model of P21[°]-EM1, a new method of stray loss measurement is adopted, in which the stray loss in the structure is obtained by subtracting the accurate simulation value of the model excitation coil loss from the total loss measurement value of the model. The obtained results are used as experimental values to verify the calculation result of the analytical formula. The results show that the calculative results of the fundamental wave loss of the copper plate are generally consistent with the experimental values. The copper plate loss under the fundamental wave superimposed multiple harmonic excitation is almost the same as the sum of the copper plate loss under each individual harmonic excitation. Under the same excitation current frequency, the stray loss of the copper plate satisfies a certain proportional relationship with the square of the current size. Under the same excitation current size, the relationship between the copper plate loss and the 0.8 times of the current frequency does not satisfy the frequency characteristic given by IEC standard. In these regards, a correction factor that considers the magnetic field distribution is introduced to correct the frequency characteristics. The effectiveness of the correction factor is verified by comparison results obtained from the correction approach and the experimental value.

Key words: power transformers; copper shield; harmonic current; stray loss; IEC61378-2; P21[°]-EM1 model

附录

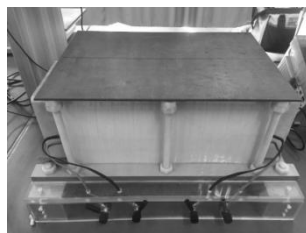


图 A1 铜屏蔽实验模型
Fig.A1 Copper shielding model

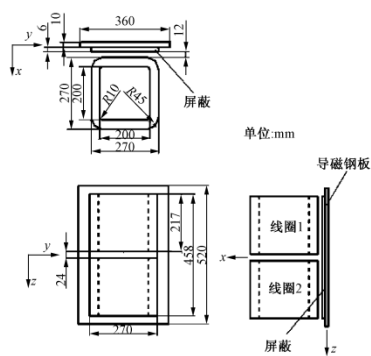


图 A2 实验模型结构图
Fig.A2 Structure and Parameters of the Model



图 A3 负载与空载测量示意图（左：负载试验）
Fig.A3 Load and no-load measurement diagram