

变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究

谢茜,张宗喜,丁理杰,冯运,刘睿

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:变压器抗短路能力校核是评估大型电力变压器抗短路能力的重要方法。文中对4台220 kV变压器进行抗短路能力校核,对校核结果不合格的原因进行了分析;针对抗短路能力不足的变压器提出通用治理策略,建议结合变压器诊断性电气试验及油色谱试验评估变压器状态,制定针对性的治理措施。

关键词:变压器;抗短路;校核;治理

中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0054-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220510

Analysis of Unqualified Check for Anti-short-circuit Ability of Transformers and Research on Treatment Measures

XIE Qian, ZHANG Zongxi, DING Lijie, FENG Yun, LIU Rui

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Checking the anti-short-circuit ability of transformers is an important method to evaluate the anti-short-circuit ability of large power transformers. The anti-short-circuit ability of four 220 kV transformers are checked, and the reasons for their unqualified check are analyzed. A general treatment strategy is proposed for transformers with insufficient anti-short-circuit ability. It is recommended to evaluate the transformer status by diagnostic electrical test and oil chromatography test, and to formulate the targeted treatment measures.

Key words:transformer; anti-short-circuit; check; treatment

0 引言

大型电力变压器的抗短路能力对电网的安全稳定运行具有重要意义。对变压器进行抗短路能力校核是提高变压器抗短路能力,减少变压器因抗短路能力不足引起经济损失的有效方法。有限元仿真分析是变压器抗短路能力校核的通用方法^[1-3]。自2019年以来,基于有限元法对大型变压器进行抗短路能力校核是国家电网公司提升变压器抗短路能力的重要抓手。根据前期校核结果,抗短路能力校核不合格在220 kV在运变压器中普遍存在,据不完全统计,不合格率约为23.1%。

当前,在运220 kV变压器抗短路能力校核的判据为GB/T 1094.5—2008《电力变压器 第5部分:承

受短路的能力》^[4]。下面基于有限元分析对某厂家4台220 kV在运变压器进行抗短路能力校核,对变压器抗短路能力不足的原因进行分析,并提出治理策略以及治理方案的制定建议。

1 校核结果

采用变压器抗短路能力校核平台对变压器抗短路能力进行校核。校核时,根据GB 1094.5—2008的要求计算得到的短路电流,计算校核不同工况下每台变压器各线圈的各项指标^[4]。

校核结果表明,4台主变压器抗短路能力均不满足GB/T 1094.5—2008的要求。4台主变压器的抗短路能力不合格项明细见表1。表中,HV_{max}代表高压最大电压分接,HV_{rat}代表高压额定分接,

HV_{min} 代表高压最小电压分接, MV 代表中压, LV 代表低压。

表 1 主变压器抗短路能力不合格项明细

变压器	工况	不合格项	安全裕度
1 号	HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力	0.78
		公共压环(或压板)上的压缩应力	0.94
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.69
		公共压环(或压板)上的压缩应力	0.87
	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.74
		MV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.26
		低压:导线倾斜极限力	0.34
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.78
		MV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
2 号	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.86
		HV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.27
		低压:导线倾斜极限力	0.33
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.8
		HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.57
3 号	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.78
		HV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.27
		低压:导线倾斜极限力	0.32
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.78
		HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.69
4 号	MV-LV	公共压环(或压板)上的压缩应力	0.98
		低压:环形压缩应力	0.3
		低压:导线倾斜极限力	0.67

2 原因分析

表 1 的结果表明,4 台变压器抗短路能力校核的不合格项集中在以下方面:

- 1) 变压器在高-中运行时,高压线圈及中压线圈导线倾斜极限力不满足要求;变压器在高-低运行时,低压线圈导线倾斜极限力不满足要求。
- 2) 变压器在高-中运行时,公共压环(或压板)上的压缩应力不满足要求。
- 3) 变压器在中-低运行时,低压线圈抗短路能力指标不满足要求。

下面对这三方面的不合格原因进行分析。

2.1 导线倾斜极限力

根据 GB/T 1094.5—2008,4 台变压器的抗短路能力校核需要计算不同的指标,每个指标的计算方法及要求不同,导线倾斜极限力为其中的一个指标。对于芯式变压器,当绕组收到过大的轴向压缩力时,会丧失其机械动稳定性,此时绕组发生“倾斜”,即在绕组幅向宽度内同一排各相邻导线出现了整体向同一方向倾斜,而沿轴向相邻的下面一排导线组则整体向相反的方向倾斜,由此便认为绕组导线呈“曲折形”变形^[5-8]。因此,GB/T 1094.5—2008 要求作用在绕组上的最大轴向压缩力要小于因导线发生倾斜时诱发塌陷的极限力 F_{tilt}^* ,即导线倾斜极限力^[4]。

F_{tilt}^* 的计算公式^[4]为

$$F_{\text{tilt}}^* = \left[K_1 E_0 \frac{nb_{\text{eq}} h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \frac{nXb_{\text{eq}}^3 \pi D_{\text{mw}} \gamma}{h} \right] K_3 K_4 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: E_0 为铜的弹性模数,110 kN/mm²; n 为绕组幅向宽度中导线数或组合导线数(用扁导线时); b_{eq} 为导线幅向宽度(用扁导线时),mm; D_{mw} 为绕组平均直径,mm; X 为连续式、螺旋式绕组的垫块覆盖系数, $X = \frac{cz}{\pi D_{\text{mw}}}$ (其中, c 为幅向垫块宽度,mm; z 为在圆周上的幅向垫块数); h 为导线的高度(用扁导线时,如果是两根轴向并排的且用纸包为一体的导线则为单根导线高度的 2 倍;如果是换位导线则为单根导线的高度),mm; γ 为导线形状常数,对于全圆角半径导线取 0.85,对于标准圆角半径取 1.0; K_1 为扭曲项系数,取 0.5; K_2 为分层叠置项系数,单根或双根导线取 45 N/mm²,非自粘性换位导线取 22 N/mm²; K_3 为计及铜工作硬度等级的系数(见 GB/T 1094.5—2008 表 A.3); K_4 为计及动态倾斜的系数(见 GB/T 1094.5—2008 表 A.4)。

按照 GB/T 1094.5—2008,对于由自粘性换位导线构成的绕组,因其良好的轴向稳定性,不需进行倾斜力的校核^[4]。此次校核的 4 台主变压器,其高压及中压线圈均使用纸包组合线,低压线圈使用纸包扁线。

1 号主变压器出厂日期为 2007 年 6 月,2 号主变压器出厂日期为 2008 年 7 月,3 号主变压器

出厂日期为 2007 年 4 月,4 号主变压器出厂日期为 2010 年 5 月。4 台主变压器生产时,均依据 GB 1094.5—2003《电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力》对变压器的抗短路能力进行相关设计^[10]。

在 GB 1094.5—2003 中,没有明确导线倾斜极限力的计算方法,相关的计算方法及指标要求首次出现是在 GB/T 1094.5—2008 中。由于 2008 版国家标准对主变压器抗短路能力的要求高于 2003 版国家标准,而厂家在变压器设计时没有采用 2008 版国家标准规定的方法对导线倾斜极限力进行计算,导致其承制的变压器该指标不满足 2008 版国家标准的要求。

2.2 公共压环(或压板)上的压缩应力

当变压器绕组轴向压力不足,特别是采用单一压板压紧多个绕组时,个别绕组的轴向压力不足或上部压板强度不够时,绕组轴向推力会导致绕组顶部上翘严重变形^[4]。根据 GB/T 1094.5—2008,公共压环(或压板)上的压缩应力是变压器抗短路能力校核中的一个指标,需满足小于 80 MPa 的要求^[4]。

对于公共压环(或压板)上的压缩应力,计算方法在 GB/T 1094.5—2008 中没有要求,此次采用有限元仿真的方法进行计算。根据变压器设计参数搭建模型,计算得到公共压环(或压板)上的压缩应力,结果见表 2。

表 2 主变压器公共压环(或压板)上的压缩力不合格明细

变压器	工况	压缩应力 计算值/MPa	安全裕度
1 号	HVmax-MV	85.1	0.94
1 号	HVmin-MV	91.6	0.87
4 号	HVmin-MV	81.4	0.98
4 号	HVmin-MV	81.4	0.98

GB 1094.5—2003 中没有对公共压环(或压板)上的压缩应力这项指标进行明确要求。LY/T 1278—1998《电工层压木板》^[11]中,对压环(或压板)的机械强度要求为“垂直层向压缩强度 ≥ 100 MPa,垂直层向弯曲强度 ≥ 100 MPa”。而此 4 台变压器在设计时主要考虑在一定裕度下公共压环(或压板)上受到的应力小于其本身的机械强度。因此,标准差异性设计理念不一致是造成主变压器该指标校核不合格的主要原因。

2.3 中-低运行时低压线圈抗短路指标

根据表 1,当各主变压器中-低运行时,主变压器低压线圈环形压缩应力、导线倾斜极限力、垫块轴向最大压缩应力 3 个指标不合格。对这 3 项指标的国家标准要求,均首次出现在 GB/T 1094.5—2008 中。而对于主变压器低压线圈环形压缩应力、垫块轴向最大压缩应力,其计算方法在 GB/T 1094.5—2008 中也没有明确规定,此次采用有限元仿真的方法进行计算。

由于大部分 220 kV 主变压器低压侧,在实际运行时没有出线只带有少量无功设备,出于经济性考虑,对于 220 kV 主变压器的选型,常选用低压半容量的型号。当低压采用半容量设计时,变压器中-低短路阻抗设计值较小,抗短路能力较弱。此次校核的 4 台主变压器均采用低压半容量设计,如表 3 所示。

表 3 各主变压器参数明细

变压器	型号	额定容量/ kVA	额定电压/ kV	中-低短 路阻抗/%
1 号	SFSZ9-H- 180000/220GY	60 000/60 000 /30 000	220/121/10.5	7.45
2 号	SFSZ9-H- 150000/220GY	50 000/50 000 /25000	220/121/10.5	7.50
3 号	SFSZ9-H- 150000/220GY	50 000/50 000 /25 000	220/121/10.5	7.50
4 号	SFSZ10-H- 180000/220GY	60 000/60 000 /30 000	220/121/38.5	7.84

由于 220 kV 主变压器实际运行中极少存在中-低运行方式及选型,因此厂家没有对中-低运行方式下主变压器的抗短路能力进行考虑,导致在该运行方式下主变压器抗短路能力校核不合格。

3 治理措施

对于抗短路能力校核不合格的大型变压器,可以从 4 个方面采取措施进行治理^[12]:

1)在增强变压器自身抗短路能力方面,可采用整体更换、线圈改造的策略进行治理,必要时可进行站间调配或退役;

2)在减小变压器可能承受的短路电流方面,可采用加装限流电抗器、加装中性点电抗器等策略进行治理;

3)在减少可能发生的短路事件方面,可采用治理变压器运行环境的策略进行治理,例如低压侧绝

缘化、防止线路异物搭接等;

4)在缩短变压器短路故障电流持续时间方面,可采用优化保护配置及定值设置的策略进行治理。

治理时,为实现设备运行可靠性、使用效率和经济性的综合平衡,常采用多措并举、综合治理的方式确定治理策略。可结合资产全寿命周期管理的情况,根据校核不合格项、运行年限、重要程度、遭受短路冲击历史、短路故障历史等实际情况,确定治理方案。同时结合变压器实际状态,采取针对性的治理措施。

对于变压器的状态,可采用诊断性试验与油色谱数据相结合的方式进行评估^[13]。停电进行诊断性试验时,可结合电容量、频率响应曲线、短路阻抗三方面的结果综合评估变压器绕组情况。电容量试验可依据 DL/T 474.3—2018《现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 $\tan \delta$ 试验》^[14];频率响应曲线测试可依据 DL/T 911—2016《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》^[15];短路阻抗试验可依据 DL/T 1093—2018《电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则》^[16]。绕组变形的分析与判断可参考标准进行^[14-16]。

4 结 论

变压器抗短路能力校核是评估变压器抗短路能力的重要手段。对抗短路能力校核不合格的原因进行深入分析可为制定针对性治理方案提供依据。所述4台220 kV在运变压器,其抗短路能力校核不合格的主要原因是 GB/T 1094.5 标准进行了更新,提出了更高的要求,导致设备本身抗短路能力不满足2008版更新后的国家标准要求。

抗短路能力校核不合格的在运变压器的治理,面临停电时间以及经济性等因素的制约。因此针对此类校核不合格的变压器,应先对其进行诊断性试验,结合状态检修试验结果评估变压器绕组变形情况,再根据实际情况采取针对性地治理措施。对于诊断性试验无异常的变压器,建议对变压器运行环境进行治理,减少短路事件的发生,同时加强监测,在遭受近区短路后,进行停电试验。

参考文献

[1] 姜山. 电力变压器绕组变形的受力分析[D]. 北京:华北电力大学,2012.

- [2] 赵志刚,李光范,李金忠,等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3214-3220.
- [3] 刘凡,姚陈果,陈凌,等. 基于有限元法电力变压器绕组的短路电动力分析[J]. 电测与仪表,2016,53(4):113-117.
- [4] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB/T 1094.5—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [5] 张明丽. 大型变压器抗短路能力校核研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [6] 刘军,张安红. 电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真和评估[J]. 变压器,2012,49(6):14-25.
- [7] 郭健,高昌平. 非晶合金变压器抗短路能力校核模型与短路承受能力评估技术研究[J]. 变压器,2017,54(8):24-30.
- [8] 李阳阳,刘文里,王录亮,等. 三绕组变压器中压绕组短路电动力的计算方法[J]. 黑龙江电力,2012,34(5):344-348.
- [9] 张丙旭. 提高变压器承受短路能力的实验研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.
- [10] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB 1094.5—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [11] 全国人造板标准化技术委员会. 电工层压木板:LY/T 1278—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [12] 刘宏亮,范辉,张书琦,等. 电力变压器抗短路能力校核及治理[M]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [13] 富强. 突发短路故障造成变压器损坏的原因分析及预防措施[J]. 高压电器,2008,44(6):569-573.
- [14] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会. 现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 $\tan \delta$ 试验:DL/T 474.3—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [15] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会. 电力变压器绕组变形的频率响应分析法:DL/T 911—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [16] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则:DL/T 1093—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

谢 茜(1990),博士,高级工程师,主要从事变压器类设备状态评价、故障分析及新技术研究。

(收稿日期:2022-06-01)