

多绕组变压器副边短路故障保护策略分析

周宁

(中国石化工程建设有限公司, 北京 100101)

摘要:针对多绕组移相变压器单个绕组短路故障难于检测的问题,介绍了基于原边三相电流及三相电压采样的故障判断方法。该方法通过计算原边电流无功及负序分量,能够及时判别变压器副边短路故障。理论仿真及实际测试结果表明,该方法可实现多绕组变压器副边短路的快速保护。

关键词:多绕组变压器;短路保护;无功功率;负序分量

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed23391

Short Circuit Fault Protection Strategy Analysis of Secondary Side of Multi-winding Transformer

ZHOU Ning

(SINOPEC Engineering Incorporation (SEI), Beijing 100101, China)

Abstract: The protection of short-circuit fault at the secondary side of a multi-winding transformer is very difficult. To solve this problem, a fault judgment method based on the voltage and current sampling of the primary side of the transformer was introduced. This method can output the working status of the transformer in time by calculating the reactive power and negative sequence current components of the primary side. Theoretical simulation and actual test results show that this method can realize rapid protection of the secondary side short circuit of the multi-winding transformer.

Key words: multi-winding transformer; short circuit protection; reactive power ; negative sequence current components

近年来,基于串联H桥拓扑的高压变频装置在冶金、电力、化工等行业得到了广泛使用。为减小网侧谐波影响,该类变频装置输入端一般采取变压器多个副边绕组移相供电方案。由于副边绕组数目较多,目前所有该类变频器均采用原边电压和电流采样方法。当副边发生短路时变压器原边电特性参数无明显变化,系统无法及时检测和判断短路故障,进而引起故障扩大,对系统产生巨大危害。因此,多绕组移相变压器副边短路故障检测和保护技术成为提升串联H桥型高压变频装置可靠性亟待解决的问题之一。

多副边绕组变压器整体结构较为复杂,原副边及各副边绕组间磁路耦合程度较高。现有文献通常使用磁场及电路耦合分析的方法,通过数值分析计算绕组短路时变压器磁场分布及线圈间电动力。该类方法仅用于评估变压器短路故

障状态绕组线圈电动力承受能力,不能准确及时判断短路故障^[1-5]。

针对上述问题,本文提出了一种基于原边电流无功和负序分量监测的多绕组副边短路判断方法,分析了短路工况变压器各电气参数变化,通过Matlab/Simulink仿真及实验的方法证明了该策略的可行性。

1 多绕组变压器结构分析

多副边绕组移相变压器是串联H桥拓扑高压变频器重要组成部分,副边绕组数量与变频器和功率模块电压等级相关^[6]。如图1所示,多副边绕组移相变压器位于高压变频装置输入侧,用于电气隔离及电压变换,原、副边电压比为10 kV/690 V。为实现电网侧电流谐波抑制,副边分为每相相位相互偏移7.5°的3×8个绕组,分别为功率模块独立供电。

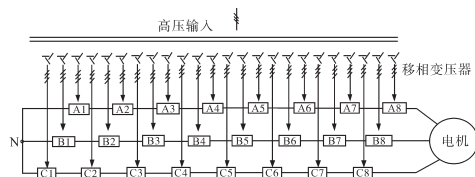


图1 10 kV 变频系统原理示意图

Fig.1 Diagram of 10 kV converter topology

图2为多副边绕组变压器结构示意图,其磁路采用三相共铁心布置方式,原边绕组靠近铁心,副边绕组位于铁心外侧,按联结组标号及移相角度分为多组抽头。从图中可以看出,副边绕组空间位置并非完全对称,各个绕组间漏阻抗存在差异。

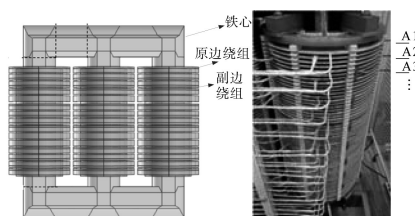


图2 多副边绕组变压器磁路结构示意图

Fig.2 Diagram of magnetic circuit structure of multi-winding transformer

2 多绕组变压器单副边绕组短路分析

高压变频器由多个功率模块组成,当单一功率模块发生故障失效时,一般采用功率模块旁路的形式维持系统正常运行。但是,若功率模块内部存在 IGBT、熔丝故障时,极易引起对应副边绕组短路故障。由于单个绕组容量较小,控制系统无法及时判断出变压器副边绕组短路状态。若短路故障无法及时排除,持续的短路电流将会导致变压器自身温度过高,进而引发火灾等次生灾害。因此,变压器副边短路发生时必须及时检测出故障并分断原边断路器,防止故障扩大。为获取多绕组变压器短路状态时变压器电气特征分量变化,首先对变压器电流幅值及磁通分布进行分析。

2.1 多绕组变压器副边短路计算

图3为多绕组变压器单副多绕组短路示意图,其中每相8个功率模块。

当单个副边绕组发生短路失效时,副边绕组电压电流满足以下关系^[7]:

$$\sqrt{2} U_N \sin(\omega t + \alpha) = R_K i_K + L_K \frac{di_K}{dt} \quad (1)$$

式中: U_N 为副边额定电压; i_K 为副边短路电流; L_K 为基于变压器漏电抗的漏电感; R_K 为回路等效电

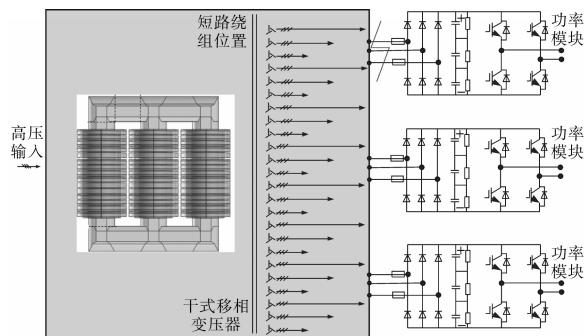


图3 多绕组变压器单副边绕组短路示意图

Fig.3 Diagram of single secondary side short circuit of multi-winding transformer

阻; ω 为电源频率; α 为初始相角。

解此方程可得副边短路冲击电流解析式,如下式所示:

$$i_K = \sqrt{2} I_K [-\cos(\omega t + \alpha) + \cos \alpha e^{-t/T_K}] \quad (2)$$

其中

$$T_K = L_K / R_K$$

式中: I_K 为稳态短路电流; T_K 为时间常数。

从式(2)可以看出,短路冲击电流取决于稳态短路电流及合闸时刻电压、电流相位。

当 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 时,副边短路电流无动态冲击过程,

电流最大值 $i_{Kmax} = \sqrt{2} I_K$;当 $\alpha = 0$ 时,半个周期后副边短路冲击电流幅值最大,电流最大值为

$$i_{Kmax} = \sqrt{2} I_K [1 + e^{-\pi/(\omega T_K)}] = k_y \sqrt{2} I_K \quad (3)$$

式中: k_y 为短路冲击电流与稳态电流之比。

大容量变压器副边短路阻抗标么值一般为2%~6%, k_y 一般取1.8,按照式(3)计算,副边短路电流可超过额定电流值数十倍。但是,由于副边绕组数目较多,单个绕组额定功率仅为变压器原边功率的 $1/N$ (N 为单相功率模块数目)。在单个副边绕组短路工况下计算变压器原边短路电流冲击时,不仅要考虑变压器绕组匝数比,还需要按照副边功率模块数目进行折算。

以功率模块数目 $N=8$ 、原副边匝数比为10/0.69、变压器副边短路阻抗4%为例,当副边绕组产生短路故障时,副边冲击电流倍数 $k_s = 1 \div 0.04 \times 1.8 = 45$ 。原边冲击电流倍数 $k_p = 1 \div 0.04 \times 1.8 \div 10 \div 0.69 \div 8 = 0.39$ 。

从上述分析可以看出,多绕组副边短路时原、副边均会产生瞬态冲击电流,冲击电流和短路时刻电源相位相关。由于绕组数目较多,单个副边绕组短路时,原边电流幅值变化不大,系统端保护设备无法及时判断出短路故障。

2.2 多绕组移相变压器副边短路电磁仿真

除绕组数目影响外,多绕组变压器副边绕组空间分布不均,各个绕组漏阻抗存在差异,短路时冲击电流也不尽相同。为分析变压器漏磁变化,在Ansoft软件中分别对变压器正常运行及单个副边绕组短路工况进行了仿真。图4为变压器输出额定电流时磁场分布,图5为单个副边绕组发生短路时磁场分布。对比两种工况仿真结果可以看出,当变压器副边短路时,副边绕组漏磁明显增大,且与空间位置相关,各个绕组间漏磁场分布不均,但对磁路主磁通影响不大。

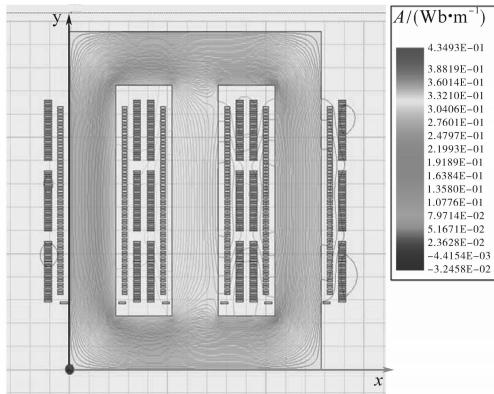


图4 额定电流状态磁通分布

Fig.4 Flux distribution under rated operating conditions

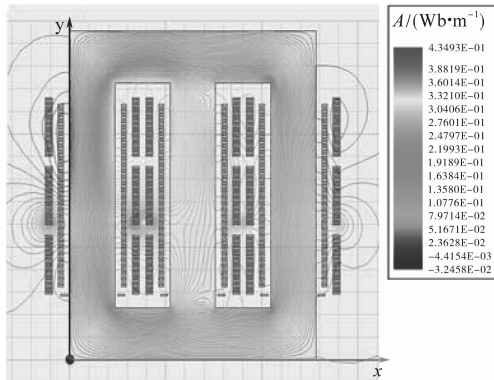


图5 副边短路工况磁通分布

Fig.5 Flux distribution under short-circuit conditions of secondary side

综上分析,多绕组变压器副边绕组短路时会产生冲击电流,通过检测副边绕组电流可及时判断出副边绕组短路故障。由于副边线圈数目较多,全部检测需要大量测量装置,对高压变频器而言,不仅成本高,而且会影响系统的体积和安规设计。采用这种传统方法显然不现实。同时,在副边绕组数量较多的前提下,单个副边绕组短路功率不足以在变压器原边产生明显的冲击电

流,部分工况短路电流小于变压器额定电流,无法通过检测原边电流幅值大小的方式实现副边短路快速判断和保护。

3 变压器副边短路检测方法

多绕组变压器副边短路后,变压器主磁通无明显变化,但显著影响了原边电流无功及负序分量。本文从变压器无功功率及负序分量的角度对副边绕组短路过程进行分析。

在Matlab/Simulink软件中搭建了针对该工况的仿真电路。仿真电路由多绕组移相变压器、功率模块、PWM发波模块及模拟断路器等部分组成。其中多绕组变压器副边包含3×8绕组,变压器参数如下:额定容量1 000 kVA,额定电压10 kV,额定输入电流57.7 A,短路阻抗8.3%,副边额定输出电流34.9 A,变比10 000/690。

仿真过程中实时测量变压器原边电压电流参数,通过计算获取变压器原边电流有功、无功电流、功率因数及负序电流分量。变压器原边有功及无功功率计算原理如下2式所示:

$$P = U_A I_A \cos \alpha + U_B I_B \cos \alpha + U_C I_C \cos \alpha \quad (4)$$

$$Q = U_A I_A \sin \alpha + U_B I_B \sin \alpha + U_C I_C \sin \alpha \quad (5)$$

式中: P 为变压器有功功率; U_A, U_B, U_C 为三相电压; I_A, I_B, I_C 为原边电流; $\cos \alpha$ 为功率因数; Q 为变压器无功功率; $\sin \alpha$ 为对应正弦分量。

相位角通过坐标变换获取,计算模块如图6所示。

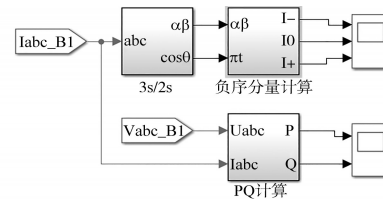


图6 计算模块

Fig.6 Calculation module

图7为副边两相绕组短路发生前后变压器原边电流波形,图8为对应的原边有功、无功功率及功率因数变化波形,图9为计算后的原边电流正序及负序分量波形。从仿真结果可以看出,多绕组变压器发生单个副边绕组短路故障后,变压器原边电流与额定电流接近,但无功功率及负序电流分量显著增加。

因此,通过对无功功率及负序分量幅值进行判断即可实现副边短路工况准确判断。

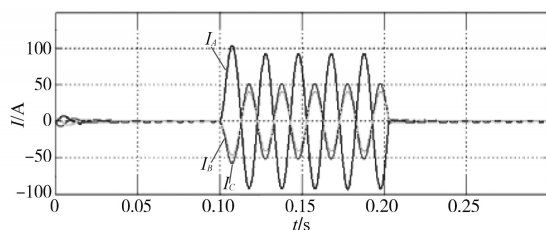


图7 原边电流仿真波形

Fig.7 Waveforms of primary side current

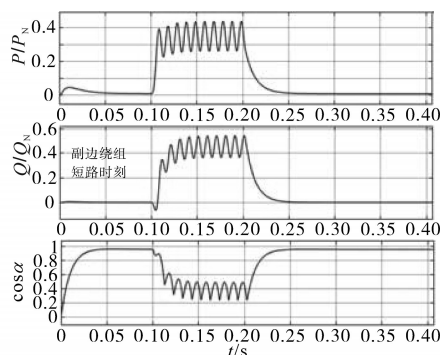


图8 变压器原边有功、无功功率及功率因数波形

Fig.8 Waveforms of active power, reactive power and power factor

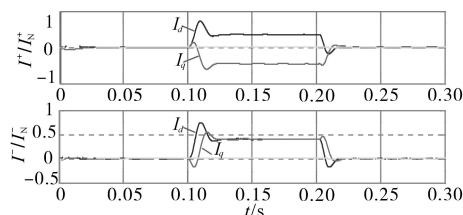


图9 原边电流正序、负序分量波形

Fig.9 Waveforms of positive sequence and negative sequence components of primary side current

4 实验验证

短路实验平台原理如图10所示,该平台基于10 kV高压变频器,变压器详细参数见第3节,功率模块规格为690 V/57 A等级。实验时通过短接功率模块输入端子的方式模拟变压器副边绕组短路故障。

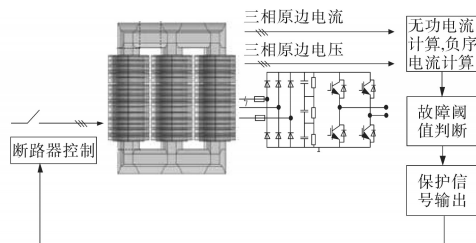


图10 副边短路测试实验原理图

Fig.10 Diagram of secondary side short circuit protection test

图11为副边绕组短路故障发生时原边电流波形,与图7对应的仿真波形相比,波形趋势基本一致,均与变压器额定峰值电流接近。

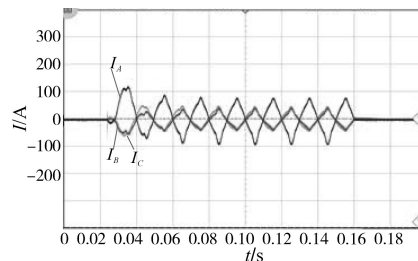


图11 副边短路时刻原边电流波形

Fig.11 Waveforms of primary current at secondary short-circuit time

分别对不同位置功率模块绕组进行短路测试,经控制系统采样计算得到变压器原边电流有功功率、无功功率、功率因数及负序分量,计算结果如表1所示。从表中数据可以看出,不同功率模块位置绕组发生短路故障时原边电流无功及负序电流分量均超过50%,此时检测误差不影响故障判断。

考虑到正常变化时负载有功功率及功率因数变化,选取无功分量及负序分量幅值作为短路故障判断依据。控制系统实时采样变压器原边电压电流信号,并进行无功电流及负序电流计算。当超过故障判断阈值时,控制系统报出副边短路故障,并及时发出指令切断主回路。

表1 变压器原边电流有功功率、无功功率、功率因数及负序分量

Tab.1 Active power, reactive power, power factor and negative sequence of primary side current

短路位置	P/P_N	Q/Q_N	$\cos\alpha$	I_2/I_N
功率单元1	50%	68%	0.41	78%
功率单元2	56%	72%	0.46	80%
功率单元3	35%	51%	0.35	55%
功率单元4	46%	66%	0.39	70%

图12为副边短路保护试验测试波形,从图中可以看出,变压器短路发生45 ms后控制系统即实现故障保护输出,并及时跳开了10 kV侧断路器,实现了副边短路工况下的变压器快速保护。

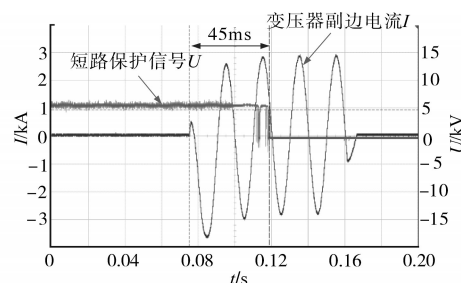


图12 副边短路保护测试波形

Fig.12 Waveforms of secondary side short circuit protection test

5 结论

高压变频器的多绕组变压器副边绕组数目较多,发生短路故障时难于及时、准确判断,影响设备安全运行。文中对短路情况进行了详细分析并给出了基于原边电压电流检测的多绕组变压器副边短路故障判断方法。该方法无需检测副边各个绕组电流,仅需要采集变压器原边电压、电流参数。通过计算变压器原边电流无功及负序分量,可准确判断出副边短路状态,降低了硬件复杂度,提高变频器系统可靠性。通过 Matlab/Simulink 仿真及模拟实验验证了相关计算方法的有效性。

参考文献

- [1] 王康,王国彬,曾静岚,等.一种变压器短路试验供电装置网侧电流平衡控制研究[J].电气传动,2021,51(10):30-37.
Wang Kang, Wang Guobin, Zeng Jinglan, *et al.* Research on current balance control of grid side for a transformer short circuit test power supply device[J]. Electric Drive, 2021, 51(10): 30-37.
- [2] 黄磊,郭栋,赵越岭,等.配电变压器绕组状态在线评估系统研究[J].电气传动,2021,51(2):62-68.
Huang Lei, Guo Dong, Zhao Yueling, *et al.* Research on on-line winding state evaluation system of distribution transformer [J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 62-68.

- [3] 杨海伟,景崇友,杜振斌,等.干式移相整流变压器短路故障问题的数值分析[J].变压器,2020,57(6):1-5.
Yang Haiwei, Jing Chongyou, Du Zhenbin, *et al.* Numerical analysis of short-circuit fault problem of dry-type phase-shifting rectifier transformer[J]. Transformer, 2020, 57(6): 1-5.
- [4] 曹会川,边庆恺,王亚静,等.采用电磁仿真软件计算变压器的短路阻抗[J].电气应用,2020,39(5):67-71.
Cao Huichuan, Bian Qingkai, Wang Yajing, *et al.* Using electromagnetic field simulation analysis software to calculate the short-circuit impedance of transformer[J]. Electrotechnical Application, 2020, 39(5): 67-71.
- [5] 张帆,杨松伟,詹江杨,等.电力变压器抗短路能力综合治理技术研究[J].变压器,2020,57(9):12-17.
Zhang Fan, Yang Songwei, Zhan Jiangyang, *et al.* Research on comprehensive improvement technology of anti-short circuit ability of power transformer [J]. Transformer, 2020, 57(9): 12-17.
- [6] 吴斌.大功率变频器及交流传动[M].北京:机械工业出版社,2015:95-144.
Wu Bin. High power converters and AC drives[M]. Beijing: China Machine Press. 2015: 95-144.
- [7] 辜成林,陈乔夫,熊永前.电机学[M].武汉:华中科技大学出版社,2005:162-164.
Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. Electric Machine[M]. Wuhan. Huazhong University of Science and Technology Press. 2005: 162-164.

收稿日期:2021-04-21

修改稿日期:2021-05-30

(上接第75页)

- 置设计[J].电气传动,2019,49(5):93-96.
Tang Hongyu, Huang Haifeng, Tang Yuqing, *et al.* Design of temperature and current testing device for intelligent equipment [J]. Electric Drive, 2019, 49(5): 93-96.
- [8] 周园春,王卫军,乔子越,等.科技大数据知识图谱构建方法及应用研究综述[J].中国科学(信息科学),2020,50(7):957-987.
Zhou Yuanchun, Wang Weijun, Qiao Ziyue, *et al.* A review on the construction method and application research of knowledge map of science and technology big data [J]. Science of China(information science), 2020, 50(7): 957-987.
- [9] 林莉,云红艳,贺英,等.基于企业知识图谱构建的可视化研究[J].青岛大学学报(自然科学版),2019,32(1):55-60.
Lin Li, Yun Hongyan, He Ying, *et al.* Visualization research based on the construction of enterprise knowledge map[J]. Jour-

nal of Qingdao University (Natural Science edition), 2019, 32(1): 55-60.

- [10] 马义松,武志刚.基于Neo4j的电力大数据建模及分析[J].电工电能新技术,2016,35(2):24-30.
Ma Yisong, Wu Zhigang. Modeling and analysis of power big data based on Neo4j[J]. New technology of electrical energy, 2016, 35(2): 24-30.
- [11] 郝培豪,高洁.基于Neo4j图数据库的警务安保知识图谱可视化分析[J].现代计算机(专业版),2018(35):8-11.
Hao Peihao, Gao Jie. Visualization analysis of police security knowledge map based on Neo4j graph database[J]. Modern Computer (Professional edition), 2018(35): 8-11.

收稿日期:2020-08-24

修改稿日期:2020-09-09