

# 统一潮流控制器用串联变压器设计

李晓明, 曹冬明, 田杰, 董云龙

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏南京 211102)

**摘要:** 串联变压器作为统一潮流控制器(UPFC)系统中的关键设备, 承担着换流器与交流系统交换功率的重要作用, 一方面需要匹配交流系统电压与换流器直流电压, 另一方面在电气结构上实现交流系统与换流器的隔离。UPFC用串联变压器在电气结构上不同于常规电力变压器, 其一次侧绕组(线路侧绕组)分相接入三相线路, 变压器一次侧绕组每相的首尾端拆开, 经6个端口接入线路; 二次侧绕组(阀侧绕组)与换流器连接, 采用常规的星型或者角型接法。串联变压器的绕组需要具备承受系统短路电流的能力, 同时需要具备持续一定时间的4倍过激磁耐受能力, 对变压器的电气、结构等方面的设计提出了严酷的要求。文中结合南京220 kV西环网统一潮流控制器工程, 分析了串联变压器的运行工况, 以此为基础提出了串联变压器的关键设备参数, 并对其恶劣工况下的耐受能力进行了仿真验证。

**关键词:** 柔性交流输电系统(FACTS); UPFC; 串联变压器; TBS

**中图分类号:** TM402

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-0665(2016)01-0041-04

作为第三代柔性交流输电系统(FACTS)设备代表, 统一潮流控制器(UPFC)是迄今为止功能最全面的FACTS装置, 能分别或同时实现并联补偿、串联补偿、移相和端电压调节等多种基本功能。UPFC既能在电力系统稳定方面实现潮流调节, 合理控制有功功率、无功功率, 提升线路的输送能力, 实现优化运行; 也能在动态方面, 通过快速无功吞吐, 动态地支撑接入点的电压, 提高系统电压稳定性<sup>[1,2]</sup>。串联变压器作为UPFC工程项目中的组成部分, 其高压侧直接串入线路, 实现UPFC与交流电网的互联。与常规并联方式的电力变压器相比, 串联变压器高压侧首末端的主绝缘与线路侧相同, 在本项目中高压侧对地的额定电压为220 kV。但正常运行时, 变压器高压侧端间的额定电压仅为15.3 kV, 额定容量为70 Mvar。当线路发生接地故障时, 故障电流将流经变压器高压侧绕组, 对变压器的短路应力、绕组温升、铁心过激磁等方面都将造成很大的影响, 在进行串联变压器的设计时, 需着重考虑以下4个方面:

(1) 短路电流耐受水平。导线的电流密度及屈服强度需进行优化选型, 加强各组件间垫块的强度以及绝缘纸筒与铁心之间的撑紧结构;

(2) 绝缘耐受水平。串联变压器高压侧为全绝缘变压器, 主绝缘与线路侧绝缘水平一致, 纵绝缘与跨越避雷器的保护水平相配合;

(3) 过激磁耐受水平。变压器在铁心结构以及磁密的设计上, 需充分考虑变压器可能承受的最大过激磁倍数及持续时间。

(4) 出线型式。串联变压器端部出线的型式需结合变电站实际情况, 采用两侧出线的方式, 经钢芯铝绞线接入线路。

## 1 运行工况

南京西环网UPFC工程的主接线如图1所示。

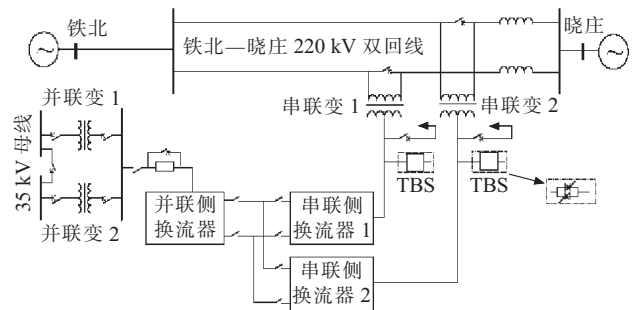


图1 UPFC结构

双回线路的2台串联变压器结构一致, 利用电力电子设备(换流器)及控制系统, 调节串联变压器高压侧端间电压的相角及幅值, 实现优化控制线路潮流及系统电压的目的。串联变压器结构如图2所示。

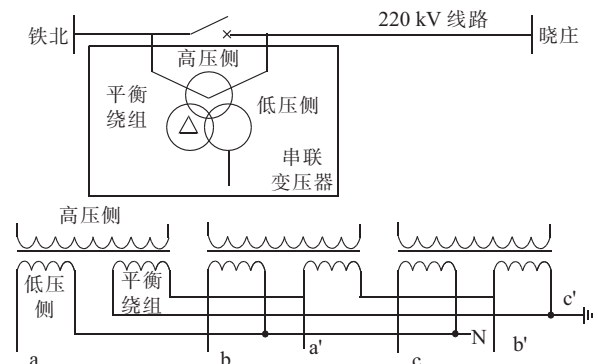


图2 串联变压器结构

高压侧绕组采用开口Y型式, 每相的首尾端子串联接入线路; 低压侧为yn型式, 连接换流器, 中性点经电阻接地; 平衡绕组采用三角形型式, 不带负载, 三相端子均引出, 其中一相端子直接接地, 其余两相端子经避雷器接地。

为实现对换流器以及串联变压器的保护,成套系统配置了阀侧晶闸管旁路开关(TBS)、TBS 阀避雷器、线路侧快速旁路开关、阀侧快速旁路开关、串联变压器高压侧跨接避雷器、线路开关共 6 道保护措施,如图 3 所示。

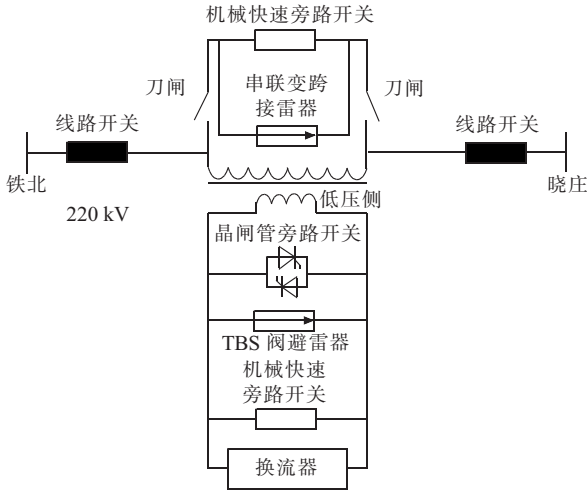


图 3 换流器和串联变压器保护措施

正常运行时,线路开关合、线路侧和阀侧快速旁路开关分、晶闸管旁路开关闭锁、阀侧跨接避雷器未达到动作电压,换流阀投入运行,串联变线路侧阀侧绕组按设定的额定工况运行。

当控制保护系统检测到系统发生故障时,立即发换流器闭锁、晶闸管旁路开关解锁、低压侧旁路开关合闸、高压侧旁路开关合闸等命令。3 ms 内低压侧晶闸管旁路开关快速动作,将串联变压器低压侧短路以保护换流器,低压侧快速旁路开关及高压侧快速旁路开关在 30~40 ms 内合闸,低压侧快速旁路开关代替晶闸管旁路开关承受短路电流,高压侧快速旁路开关将串联变压器从系统中隔离。

当上述六道保护措施发生  $N-1$  故障时,变压器需要承受较为严苛的 2 种工况。

(1) TBS 动作、高压侧旁路开关拒动。在本工况下,变压器处于短路状态,以本项目实际的短路耐受水平为依据,对串联变的短路耐受水平进行设计。根据电网的规划,采用 2020 年网架进行短路电流计算,在无 UPFC 时,铁北 220 kV 母线短路电流为 50 kA,当 UPFC 接入系统后,串联变压器的短路阻抗  $U_k\%$  较大范围地影响了系统的短路水平,严重情况下,流经串联变压器绕组的短路电流可达 26 kA。为确保变压器的安全运行,变压器高压绕组耐受短路电流水平设计值不低于 30 kA 有效值,持续 2 s,同时需要考虑该工况下铁心饱和对变压器器身的影响。

(2) TBS 拒动、高压侧旁路开关动作。在本工况下,高、低压侧快速旁路开关动作时间为 30~40 ms,在这段时间内,串联变压器将处于二次侧开路状态,高压

侧绕组端间电压有很大突变(最大 4 p.u.左右)且流过较大的系统短路电流,铁心处于非常严重的过激磁状态,变压器需按持续承受 50 ms 的 4 倍过激磁进行设计,此时流经串联变压器线路侧绕组电流为 30 kA。

## 2 关键参数

串联变压器一次侧额定电压取决于 UPFC 项目的系统需求,经仿真计算,本项目串联变压器注入线路的最大线电压为 26.5 kV,即可满足对该区域电网近、远期潮流控制的需求,二次侧电压需要与换流器的直流电压相匹配,设计值为 20.8 kV,UPFC 所安装线路的额定电流为 1525 A。串联变压器的短路阻抗  $U_k\%$  在设计时需兼顾以下 2 点:短路阻抗越大,在 UPFC 提升线路功率时,串联变压器阀侧的电压降增大,换流阀的额定容量将增加,增大投资;短路阻抗越大,在电网发生短路故障时,其短路电流限制能力越高,可以降低主设备的短路耐受水平,有利于设备的安全。本项目串联变压器的基本电气参数设计值如表 1 所示。

表 1 串联变压器基本参数

序号	名称	参数
1	变压器型式	油浸式
2	相数	三相
3	额定容量	70/70/25 MV·A
4	额定电压	26.5/20.8/10 kV
5	额定电流	1525/1943/834 A
6	额定频率	50 Hz
7	联接组标号	III(开口 Y)/yn/d11
8	冷却方式	ONAN
	绝缘水平	
	高压线端 SI/LI/AC	750/500/395 kV
9	平衡线端 LI/AC	200/85 kV
	低压线端 LI/AC	325/140 kV
	低压中性点 LI/AC	200/85 kV

串联变压器与常规电力变压器相比,其用途、要求都比较特殊,额定容量和额定电压等级取决于系统的实际需求,但均比常规电力变压器小很多。由于串联变压器一次(线路)侧绕组串联在线路中,因此当系统发生故障时,串联变压器会有较严重的过电压和过电流问题。在设计、生产、试验时针对上文中描述的典型工况,结合变压器实际的运行方式,其技术特点如下:

(1) 变压器的额定容量和额定电压等级均比较小,但由于高压侧绕组串联在线路上,因此其主绝缘水平与线路侧相同,为 220 kV 等级且为全绝缘水平。但是因高压端间正常运行时的电压较低,与阀侧电压接近,所以其高压侧端间雷电全波耐受电压需特殊设计。

(2) 变压器高压侧绕组出口发生接地短路故障,且变压器低压侧绕组处于开路状态时,变压器高压侧

绕组需承受短时4倍过励磁。为保证变压器的过励磁能力,需特殊设计硅钢片参数;铁心结构上采用三相五柱式结构,其上下铁轭采用板式夹件;铁轭采用钢质支撑件和垫脚,利用绑带拉紧夹件,心柱采用专用绑带绑扎;上下夹件通过拉板和轴头连接;变压器铁心和夹件接地通过小套管引出,同时由支柱瓷瓶引下接地;铁心与上下节油箱之间采用多点强力定位,保证串联变压器满足4倍过励磁工况下持续运行50 ms的要求。

(3) 线路侧发生接地故障时,变压器高压绕组会流过较大的短路电流,对绕组抗短路能力要求比较高。为确保变压器的抗短路能力,需按国标GB 1094.5—2008<sup>[3]</sup>的相关要求进行详细计算和验证,且所有绕组的导线采用自粘换位导线,在换位处加垫硬纸板条,以增加电气强度,所有垫块撑条倒圆角,在电场中保证较好的电极形状,靠铁心绕组内径侧采用高强度硬纸筒,外径侧采用锁撑条,平衡绕组、低压绕组内径侧增加附撑条。通过上述结构确保变压器各绕组在要求短路电流条件下具有足够的动稳定性和热稳定性。

(4) 压器高压侧串入线路中,绕组接线为特殊的开口设计方案,采用端部出线结构,分别单独引出并连接至套管(共6根220 kV级套管);同时低压绕组以66 kV绝缘水平进行设计,远远高于换流阀的额定电压,并在变压器内部连接为星接,中性点单独引出,分别连接至各自套管;另外,单独设置平衡绕组,且平衡绕组的3个端子均引出。

(5) 根据变压器的上述特殊运行工况和使用特点,高压引线采用端部水平出线结构,低压引线采用端部出线结构;所有线圈出线以及引线之间的连接均采用先进的冷压或高频焊接工艺;对高压引线所经过区域附近的电极进行圆化处理,以改善电极形状;所有引线每间隔350~400 mm设有导线夹夹紧固定。考虑变压器引出线方式满足现场接线的布置要求,变压器内部绕组排列顺序为:铁心—平衡绕组—低压绕组—高压绕组。

### 3 仿真计算

#### 3.1 过励磁能力仿真

变压器铁心过励磁时,铁心中磁通密度增加达到饱和,因饱和产生的漏磁通将使夹件、油箱等金属结构件中的涡流损耗增加,空载损耗增加,造成铁心温度升高,同时还会增大漏磁通,在靠近铁心的绕组导线、油箱箱壁和其他金属结构件中产生涡流损耗,使变压器过热,绝缘老化,影响变压器寿命,严重时造成局部变形及绝缘油损伤。变压器过励磁还会造成设备噪声增加,空载电流中高次谐波含量增大等问题。通过计算,串联变压器在额定电压下励磁电流峰值大小为3.3 A

(折算到高压侧),变压器在4倍过励磁电压下励磁电流峰值为9600 A,该值远远小于高压绕组耐受短路电流值,其引起的机械力不会导致绕组损坏。为研究串联变压器4倍过励磁电压下对铁心温升产生的影响,首先对变压器长期运行时铁心内部热点温升的计算过程进行分析。

铁心内部最热点与铁心表面温差计算(单位为K):

$$\tau_n = 28P_{Fe} K_{gy} \frac{10b^2 B^2}{10b^2 + B^2} \times 10^{-4} = 5.74 < 10 \quad (1)$$

铁心表面对油面的温升计算:

$$\tau_c = 0.35(P_{Fe} K_{gy} G_A)^{0.6} = 19.7 < 20 \quad (2)$$

铁心表面温升计算:

$$\tau_1 = \tau_{ym} + \tau_c = 65.8 < 80 \quad (3)$$

铁心热点温升计算:

$$\tau_2 = \tau_1 + \tau_{ym} + \tau_c = 71.54 < 80 \quad (4)$$

式(1—4)中: $P_{Fe}$ 为硅钢片单位质量(kg)的损耗瓦数; $K_{gy}$ 为校正系数; $b$ 为叠压厚度; $B$ 为最大片宽; $G_A$ 为安全系数。

变压器长期过励磁运行,会使铁心内部饱和而增大铁心损耗和附加损耗,铁心内部热点温升会增加。铁心内部过热是需要一定时间积累并通过热量交换传递才完成的,由于50 ms时间太短,短时产生的热量不会将整个铁心的热点温升提高。因此在4倍过励磁下持续运行50 ms,铁心热点温升几乎不变。

通过程序仿真计算,变压器在4倍过励磁下,可以持续空载运行60 ms,完全满足设计要求。串联变压器的空载过励磁曲线如图4所示。

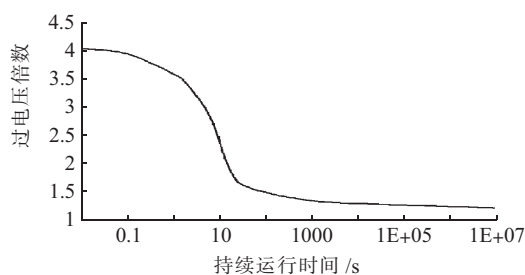


图4 串联变压器空载励磁曲线

#### 3.2 绕组机械力仿真计算

串联变压器的另一恶劣工况是变压器近端的线路发生接地短路时,将有很大的短路电流流经变压器绕组,对变压器各绕组内部、绕组间、绕组与结构件之间等承受的力或应力等提出了很高的要求,参照GB 1094.5—2008标准,高压绕组按照30 kA短路电流进行核算,低压绕组按照38 kA短路电流进行核算,平衡绕组按照高压单相对地短路感应短路电流26.5 kA进行核算,串联变压器在此工况下,各绕组机械力仿真计算结果如表2所示。



表 2 串联变压器高压短路时各绕组力和应力的对比

力或应力的类型	低压绕组		高压绕组		平衡绕组	
	发生值	许用值	发生值	许用值	发生值	许用值
绕组上的平均环形拉应力 /MPa	—	189	150.6	189	—	162
绕组上的平均环形压应力 /MPa	99.61	126	—	—	85.8	108
撑条和垫块之间的导线幅向弯曲应力 /MPa	0.42	189	—	—	2	162
幅向垫块间跨度内导线轴向弯曲应力 /MPa	11.21	189	14.6	189	4.4	162
作用于绕组出头处的推力 /kN	132.9	189	156.2	189	42.2	162
作用于绕组上的最大压力 /kN	4 763.6	158 954	7046	458 87	1242	247 504
绕组最大轴向压力及倾斜极限值(对比例出)/kN	4763	158 954	7046	458 87	1242	247 504
绕组的最大轴向端部推力—向上 /kN	14.29	158 954	—	458 87	—	247 504
绕组的最大轴向端部推力—向下 /kN	—	158 954	14.21	458 87	—	247 504
导线纸绝缘和幅向垫块的压应力 /kN	35.2	80	29	80	52.3	80
端部层压块绝缘构件和端环上的压应力 /Mpa	10.2	80	7.6	80	14.9	80
拉紧杆(拉条)上的拉应力 /MPa	140(发生值)		470~630(许用值)			
每个心柱的夹紧力 /kN	502(发生值)		275~685(许用值)			

## 4 结束语

作为以南京西环网统一潮流控制项目为依托的全新电力设备,国产化的串联变压器在设计上需要充分

结合系统各种恶劣的运行工况,为确保产品的质量,在产品正式投运前,从设计、生产、试验以及运行阶段需要着重注意以下方面:(1)在设计阶段,利用各种仿真计算软件,对变压器绕组及结构件的短路应力、过激磁水平、磁场分布、各绕组间冲击电压传递水平、器身电场分布以及设备的抗震水平等方面进行充分验证,确保产品具有充分的裕度;(2)作为特殊的电力变压器,在型式试验方案制定上需结合产品的实际运行情况。当对变压器高压侧端间进行雷电冲击试验时,低压侧和平衡绕组经避雷器接地,以验证变压器高-低和高-平间的过电压传递水平;(3)变压器的特殊试验中含短路试验,因串联变压器短路试验对电源容量(不低于 60 MV·A)有较高要求,目前国内试验站均无法满足,可以通过现场人工短路的方式对变压器的绕组短路耐受水平进行考核。

### 参考文献:

- [1] 何大愚. 柔性交流输电技术和用户电力技术的新进展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(6): 8-13.
- [2] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用——灵活交流输电系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 181-186.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB 1094.5—2008, 电力变压器第 5 部分承受短路的能力[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

### 作者简介:

- 李晓明(1982), 男, 四川遂宁人, 工程师, 从事 FACTS 设备的研究及开发工作;
- 曹冬明(1972), 男, 江苏泰兴人, 高级工程师, 从事电力系统自动化工作;
- 田杰(1969), 男, 四川秀山人, 教授级高级工程师, 从事超高压直流输电的研究及开发工作;
- 董云龙(1977), 男, 安徽安庆人, 高级工程师, 从事超高压直流输电的研究及开发工作。

## The Design of Series Transformer Applied in the Unified Power-Flow Controller

LI Xiaoming, CAO Dongming, TIAN Jie, DONG Yunlong

(Nanjing Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** As the key equipment in the UPFC, the series transformer plays an important role in the power transmission between the convertor and the AC system. The voltage of the transformer should match the AC system voltage with the DC voltage of the convertor on one hand; on the other hand the transformer can provide the electrical insulation between AC and convertor. The electrical structure of the series transformer is different with the normal one. The primary wings of the series transformer are connected in the lines in split-phase with 6 terminals and the secondary ones are connected to the convertor with the connection of star or delta. The wings of the series transformer should be capable to withstand the short-circuit current of the power system; and the equipment should also be able to withstand four times of over-excitation capacity within certain time, which require a lot to the electric and structure of the transformer. The operation conditions of the series transformer of Nanjing UPFC project have been analyzed. Based on the analysis the key parameters for the series transformer are recommended, and the tolerance conditions of the series transformer have been simulated in the end.

**Key words:** FACTS; UPFC; Series Transformer; TBS