

# Analysis of phase shifting process of oil-immersed silicon steel transformer

Tao Li

Zhengzhou Airport Creative Power Equipment Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 451171, China

## Abstract

Phase shift transformer is a kind of rectifier, used to advance or lag the voltage phase relationship of one circuit relative to another circuit. The rectifier has the functions of adjusting the phase difference between the motor voltage and the power grid voltage, improving the power factor of the motor and reducing the harmonic current. The rectifier winding current is non-sinusoidal and contains many high harmonics. The rectifier device will cause the distortion of the alternating magnetic field waveform of the rectifier transformer. In order to suppress this distortion, reduce the harmonic pollution to the power grid and improve the power factor, one of the effective ways is to carry out phase shift on the high voltage side of the rectifier transformer. This paper mainly records the production and testing process of the first phase shifting transformer, and calculates the phase shifting process of the phase shifting Angle, which provides a reference direction for the subsequent mass production and improvement process control.

## Keywords

phase shifting transformer; process control; phase shifting Angle test

## 油浸式硅钢移相变压器移相过程控制分析

李涛

郑州空港科锐电力设备有限公司, 中国·河南 郑州 451171

## 摘要

移相变压器是整流变的一种, 用于将一个电路的电压相位关系相对于另一个电路进行超前或滞后。整流变具有调整电机电压和电网电压之间的相位差、提高电机的功率因数和降低谐波电流等作用。整流变绕组电流是非正弦的含有很多高次谐波, 整流装置会引起整流变压器交变磁场波形的畸变, 为了抑制这种畸变、减小对电网的谐波污染、提高功率因数, 有效办法之一是对整流变压器高压侧进行移相。本文主要通过记录首台移相变压器的生产及测试过程, 计算了移相角的移相过程, 为后续批量生产、提升制程控制提供了参考方向。

## 关键词

移相变压器; 制程控制; 移相角测试

## 1 引言

我公司于2024年初生产了一批特种移相变压器, 联结组标号有Dy10.75、Dd11.75、Dd11.75y10.75等, 本文就其中的联结组标号为Dy10.75的首台移相变压器制程控制过程及移相角测试、计算进行简单总结, 和大家共同交流。

## 2 产品参数

首台容量为500kV·A产品技术参数如表1所示

## 3 制造过程

### 3.1 低压线圈(图1)

①低压线圈为多层圆筒式、左绕向; ②在绕线模具上

放置1.0mm厚绝缘纸板, 裹紧并用胶带固定; ③低压线圈总匝数为23匝, 使用1.0mm\*320mm铜箔绕制; ④在第8层与第9层、第16层与第17层层间放置帘式油道, 长度可调整; ⑤绕完后放置两张0.13mm点胶纸; 放置0.5mm绝缘纸板一张并用两张0.13mm点胶纸锁紧; 放置接地屏并使用两张0.13mm点胶纸锁紧; 再放置帘式油道、油道撑条侧朝向低压侧, 最后用四张0.13mm点胶纸锁紧; ⑥低压线圈预压装整形, 整形尺寸为短轴240mm;

### 3.2 高压线圈(图1):

①高压线圈基本绕组与移相绕组均为左绕向; ②线规检测: 选用平直漆包线, 测量3~5个位置, 求均值并记录; ③高压线圈分接线及出头轴向引出; ④在第5层与第6层间、第12层与第13层间放置帘式油道; ⑤层间绝缘放置三张0.13mm点胶纸、首末层多放置一张0.13mm点胶纸; ⑥按照图纸要求分别放置端绝缘; ⑦线圈最外层半叠两层收缩

【作者简介】李涛(1983-), 男, 中国河南周口人, 本科, 助理工程师, 从事变压器制程控制研究。

带；⑧线圈固化前测量基本绕组匝数及移相绕组匝数，匝数应符合图纸要求；⑨高压线圈端部不刷胶、整形尺寸为短轴336mm；

### 3.3 铁心叠制 (图 1)

①单片五级叠装、低压侧缺级放置；②铁心整体表面涂绝缘清漆，上铁轭在器身装配后再涂漆；③主级叠厚和对角线尺寸公差要求：正差 0、负差 1.0 (mm)；

### 3.4 器身装配

①检查线圈表面无污渍、无损伤，短轴尺寸符合技术

要求；②按图纸要求装配线圈绝缘件，相间隔板；③按图纸要求在铁心主级、两圆弧端与线圈之间打入环氧玻璃布板撑紧；④在铁心除主级外与铁心之间打入撑棍撑紧；⑤铜排接触面接触良好；⑥低压线圈封排与线圈出头采用螺栓连接；⑦高压接线端子与相线电缆冷压连接，压接牢固；⑧基本绕组尾头与移相绕组首头焊接后，按照图纸要求与相应首头引出线焊接；⑨器身装配完成后，要对其测量绝缘电阻，用 DC2500V 兆欧表测量，每个绕组对其他绕组及地  $\geq 5000M\Omega$ ，铁心对地  $\geq 600M\Omega$ ；

表 1 产品技术品参数

额定容量	500 kVA	额定电压	10/0.4 kV	联接组标号	Dy10.75
相数	三相	分接范围	$\pm 2 \times 2.5\%$	额定频率	50 Hz

## 4 移相角计算

高压线圈移相过程计算 (见图 2)，移相后的联结组标号是 Dy10.75，是在联结组标号 Dy11 基础上，高压右移  $7.5^\circ$ ，低压保持不变。



图 1 铁心叠制 - 低压线圈 - 高压线圈

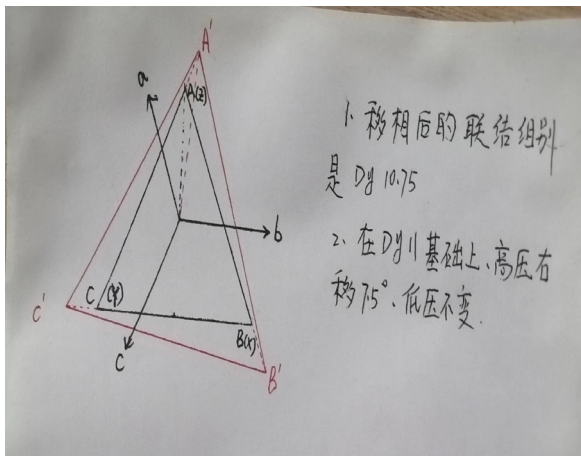


图 2 移相三角形简图

①在三角形  $A' B' A$  中， $\angle A' A B' = 120^\circ$ ， $\angle A B' A' = 7.5^\circ$  为移相角， $\angle A A' B' = 180^\circ - 120^\circ -$

$7.5^\circ = 52.5^\circ$ 。

由正弦定理得， $A A' / A B' = \sin 7.5^\circ / \sin 52.5^\circ = 0.13053 / 0.79335 = 0.16453$

$A A'$  段为移相绕组， $B B'$  段也为移相绕组， $AB$  段为基本绕组，则，基本绕组匝数 / 移相绕组匝数 = 5.08

同理：当移相角为  $15^\circ$  时，基本绕组匝数 / 移相绕组匝数 = 1.732

② 6321.801 高压技术图纸，额定档为 3 档，其匝数为 762 匝，移相绕组匝数为 150 匝。匝数比：762/150=5.08，设计值与计算值 5.08 一致。

③ 移相角计算：在三角形  $A' B' A$  中， $\angle A' A B' = 120^\circ$ ， $AA'$  段及  $BB'$  段为移相绕组 150 匝， $AB$  段随着档位的变化，匝数也变化

在极限档位 1 档时移相角最小，5 档位时移相角最大

1 档位时，运用余弦定理  $\cos A = (b^2 + c^2 - a^2) / 2bc$ ，可计算出  $A' B'$  段匝数为 1045 匝，再运用正弦定理计算出 1 档时的移相角为  $7.14^\circ$ ，计算的移相后的角度差的理论值为  $30^\circ + 7.14^\circ = 37.14^\circ$

5 档位时，可计算出  $A' B'$  段匝数为 947 匝，再运用正弦定理计算出 5 档时的移相角为  $7.89^\circ$ ，计算的角度差的理论值为  $30^\circ + 7.885^\circ = 37.89^\circ$ ，对比图 3

变比测试记录			2024-01-31 17:06:35		
2024-01-31 17:04:57			编号:		
组别: D-y-11			分接位: 05		
分接位: 01			高压电压(U) 角度		
AB	:141.66	0.0000	AB	:5.9640	0.0000
BC	:141.69	119.96	BC	:5.9598	119.95
CA	:141.77	239.99	CA	:5.9658	239.93
低压电压(U) 角度			变比 误差(%)		
AB	:5.4027	0.0000	AB	:23.759	0.04
BC	:5.4020	119.96	BC	:23.774	0.10
CA	:5.4046	239.97	CA	:23.753	0.01
变比 误差(%)			匝比 角差		
AB	:26.220	-0.11	AB	:45.413	37.15
BC	:26.230	-0.08	BC	:45.430	37.14
CA	:26.231	-0.07	CA	:45.432	37.17

图 3 1/5 档位时测试的角差

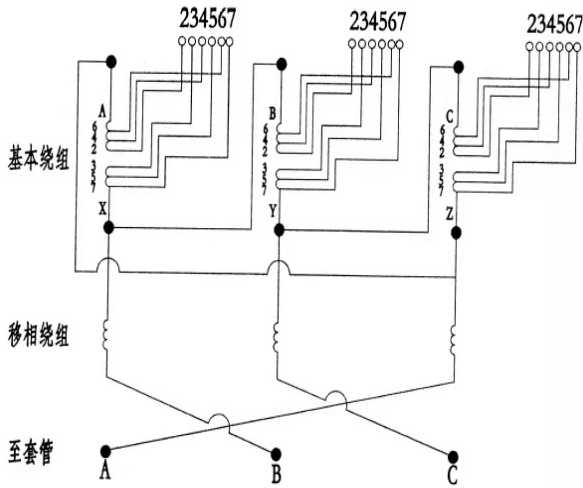


图4 高压引线连接方式

可看出，1挡位和5挡位实际测试的角度差与计算的角度差基本一致。

⑤高压引线连接方式（图4）。

移相后的外部红色三角形A' B' C'为移相后的相位图（图4），其中AA'段在移相前三角形ABC中CA（C

相）的延长线上，BB'在AB（a相）的延长线上，CC'段在BC（b相）的延长线上。要达到移相的目的，高压分接线连接时，A'、B'、C'为移相后三相的首头，所以，原c相的尾头与A'相连接引至A套管、原a相的尾头与B'相连接引至B套管、原b相的尾头与C'相连接引至C套管，至此移相完成。

### 5 器身移相角角差测试（表2）

GB/1094.1—2017对电压比的允许偏差规定：a，规定电压比的±0.5%；b，主分接上实际阻抗百分数的±1/10，取a、b两者较小值<sup>[2]</sup>。此台变压器设计值为6%，实际阻抗值为5.6%，所以，本台变压器电压比允许偏差为±0.5%。所有分接头在空载时的相位角的容差应在各自额定相位角偏移的1%以内<sup>[1]</sup>，用户和制造商协议规定相位角的允许偏差为±0.5°，移相角角差允许范围在37°-38°。

器身绝缘电阻测量结果：高压对低压及地大于5000 MΩ、低压对高压及地大于5000 MΩ、高低压之间绝缘电阻大于5000 MΩ、铁心对地绝缘电阻为1500 MΩ。

结论：1-5档电压比偏差和移相角偏差在允许范围内，合格。绝缘电阻符合协议要求，合格。

表2 角差测量

高压绕组电压 (V)	低压绕组电压 (V)	档位	电压比误差 (%)			移相角角差 (°)		
			AB	BC	CA	AB	BC	CA
10500	400	1	-0.11	-0.08	-0.07	37.15	37.14	37.17
10250		2	-0.09	-0.07	-0.09	37.32	37.33	37.33
10000		3	-0.08	-0.02	-0.08	37.48	37.51	37.54
9750		4	-0.11	0.00	-0.07	37.67	37.69	37.75
9500		5	0.04	0.10	0.01	37.86	37.90	37.92

### 6 后续批量生产预防

①阻抗通常应在整个分接头位置的最小值和最大值规定的阻抗范围内<sup>[1]</sup>。此台变压器设计阻抗值为6%，实际阻抗值为5.6%。本台变压器实际阻抗相比设计值明显偏小，可通过增加高低压线圈之间主绝缘厚度或调整油道位置来增加实际阻抗；

②首台装配时操作人员把A、B、C三相引入套管顺序错误，A、B、C三相引出线应分别接入B、C、A套管；

③器身装配时移相绕组首头，需要与基本绕组尾头焊接在一起，设计时将移相绕组高压线圈首头居不利于后续绝缘纸管套装；

④最初设计时，高压引线开关设计为双排，实际装配时发现普通单排开关就能符合器身装配要求，后续设计时可

作为参考。

### 7 结语

综上所述，随着时间的推移和技术的发展，我公司已经生产了欧式变压器、美式变压器、华式变压器以及移相变压器等各类产品，变压器制程控制是其中的一个重要组成部分，其质量影响着整个系统的运行效率和可靠性。只有全面做好变压器的制程控制才能实现更可靠的变压器产品。

### 参考文献

[1] IEEE C57.135-2011（修订版），移相变压器的应用、规范、试验指南（2011版）【S】IEEE-SA标准委员会  
 [2] GB 1094.1-2013，电力变压器 第1部分：总则【S】北京：中国标准出版社