双心式移相变压器冲击过电压的研究

移相变压器是一种特殊变压器，主要用于改善交流电网效率、提高电网传输能力，广泛应用于欧洲、北美等地区。以山东电力设备有限公司所研制的50 MV·A/220 kV双心式移相变压器样机为研究对象，对产品结构类型和试验方法进行分析，并结合仿真分析手段，对移相变压器的雷电冲击绝缘性能进行研究，为后续大容量、高电压产品的设计和生产提供依据。

张立国　杜建平　张志强　胥建文　杨同勋／山东电力设备有限公司

张立国／高级工程师

关键词／Keywords
移相变压器·
雷电冲击·
试验方法·
绝缘性能·

0　引言

现代电网的特点是相互联网以增强可靠性，大型互联电网增强了电力系统的可靠性，但系统特定部分的稳态功率潮流控制的复杂性也提高。由于并联支路阻抗的不同，电力输出的变化，负荷和负荷中心相角的变化，使这些系统中的稳态潮流变得越来越复杂，并可能偏离原设计条件。由于实际电网运行状态的多变性以及发电设备的复杂性，需要采用合适的方法对电网进行潮流的动态控制，而以移相变压器（Phase Shifting Transformer，PST）为基础的动态控制是一种行之有效的解决办法。

PST也称相角调节器（Phase Angle Regulator，PAR），是一种控制输电潮流的有效手段，可以避免输电线路或变压器主设备过负荷及欠负荷情况，提高供电可靠性，并可实现合理分配线路输送功率、提高输电通道效率及降低输电成本等作用。电网互联后，由于地域的差异，负荷的分布十分不平衡，而且负荷随昼夜和季节的变化也不相同，这使得电网中的潮流分配不平衡，并产生大量环流，增加了线路损耗。PST能够通过在电网中注入一定值的电压，来改变线路相角，控制了潮流，使电力网络中的潮流分布更加合理。同时能够抑制环流、降低网损，避免了线路或变压器的过负荷，提高供电可靠性。

本文以PST为研究对象，对PST的种类、原理、结构以及试验等进行阐述和分析。然后，以山东电力设备有限公司所研制的50 MV·A/220 kV双心式PST为基础，对该产品结构特点和雷电冲击试验方法进行研究分析，并采用雷电冲击仿真分析手段，对该产品各线圈冲击绝缘性能及电压分布特点进行研究，总结规律，并为后续产品设计提供保障。

1　PST原理

1.1　基本原理

PST是一种特殊变压器，主要用于改善交流电网效率、提高传输能力。在电力系统中，PST的主要功能是用于控制互联电网内的功率潮流。如图1所示的电力系统中，电源侧（V_S）和负载侧（V_L）有两条输电线路，并分别连接两个电力系统，分别为系统1和系统2。通常，系统1和系统2具有不同的电压等级和阻抗。

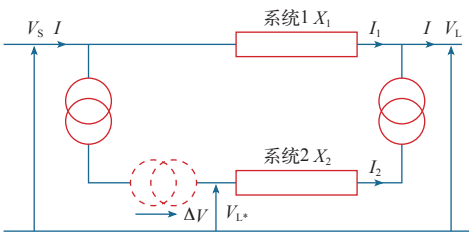


图1　并联电网的电能分配

如果不施加外部调节措施，分配在两条线路中负载电流将与系统1、系统2各自的系统阻抗成反比。假设系统1的阻抗为X_1，系统2的阻抗为X_2，则系统1、系统2中分配电流I_1和I_2分别为

$$I_1 = I\frac{X_2}{X_1+X_2} \quad (1)$$

$$I_2 = I\frac{X_1}{X_1+X_2} \quad (2)$$

由于系统中串联变压器产生的附加阻抗，系统2所分配的负载较小。为提高系统2的传输功率，可在系统中增加附加电压ΔV，以补偿系统的电压降。具体方法是在线路中安装PST，通过调整PST的移相角，使负载侧电压超前或滞后电源侧，最终实现系统1、系统2中电流分配调整。

1.2 常用类型

目前，常用PST结构主要有单心式结构和双心式结构。其中，单心式PST具有绕组数量少，结构简单的优点。其缺点是分接开关和调压绕组直接与线端连接，需要直接承受系统过电压和短路电流。

一个典型的单心式移相变压器如图2所示。由图2可知，单心式PST每一相包含两个分接开关，一个接在电源侧（S），另一个接在负载侧（L）。在实际运行时，通过调整电源侧和负载侧的分接开关，使得负载侧（L）电压超前或滞后于电源侧（S）电压。

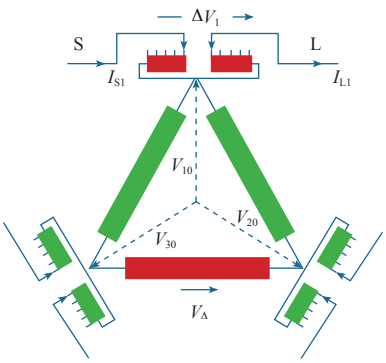


图2 单心式PST

与单心式PST不同，双心式PST由两个单元组成，分别为串联变压器和励磁变压器。其中，串联变压器串联在线路中，分别连接在电源侧（S）和负载侧（L），励磁变压器与串联变压器相连，主要作用是励磁、调压以及调整相角。图3为双心式PST在系统中的接线方式。

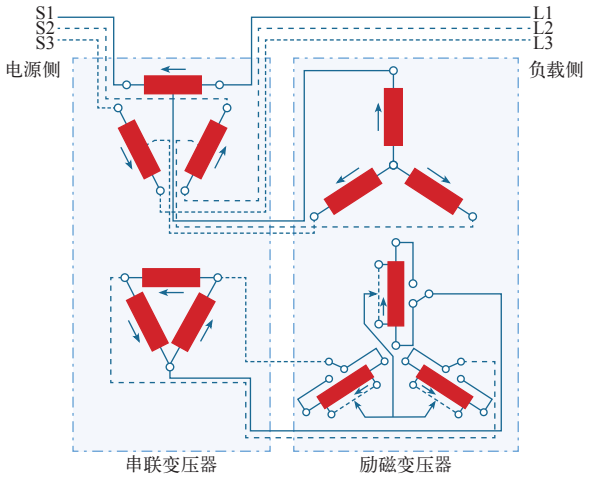


图3 双心式PST结构及接线

1.3 主要用途

目前，随着电网电能传输效率的不断提高，电网的传输能力也越来越接近极限，大大增加了电网失稳的可能性。而PST是一种合理解决办法，通过移相角的调整，对过负荷输电线路进行高效控制，从而确保电能传输安全稳定。主要作用如下所述。

1）提高电力系统运行可靠性。通过调整平行线路的负荷分配，改变电能输送功率，降低电力系统失稳概率，减少不必要电能输送，有效提高系统的可靠性。

2）降低系统运行成本。有效避免电网过负荷和失稳现象，避免系统过负荷事故，减少运行成本。另外，通过平衡电网电能流通，优化电能传输，可有效降低电网电能损耗。

3）提高现有输电线路使用效率。实时调整现有或新建输电线路的传输功率，有效提高输电线路使用效率。并且可增加现有线路载荷至发热限制，而无须考虑过负荷现象，有效避免或延缓新建线路的投资。

2 样机参数及结构

由上述可知，与单心式PST相比，双心式PST

具有调整灵活性强、传输容量大、移相角范围大且电压水平高等特点，是目前最常用的设计方式。本文以山东电力设备有限公司设计生产的50 MV·A/220 kV双心式PST样机为研究对象，对产品的试验方式、绝缘结构等进行深入研究。

2.1 性能参数

该产品为双心式三相一体式PST，产品型号为PST－50000/220，额定容量为50 MV·A，额定电压为220 kV，基本性能参数如表1所示。

表1 PST基本性能参数

名称	参数
产品型号	PST－50000/220
额定容量/kV·A	50 000
额定容量/kV	220
连线方法	串联变压器 Dd0 励磁变压器 YNyn0
移相角(°)	±40
冷却方式	ONAN
噪声水平/dB	75

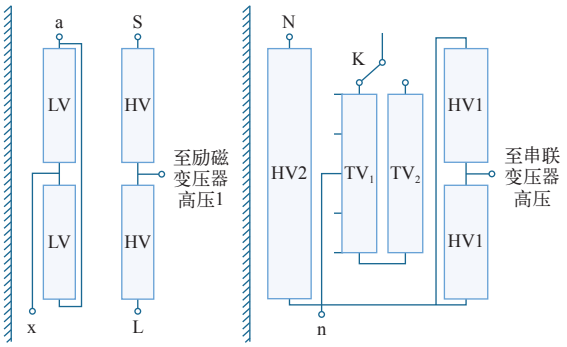
该产品由串联变压器和励磁变压器两个基本部分组成，分别安装两个独立的铁心，并安装在两个独立的油箱中，两个油箱通过特殊设计的连接盒连接在一起。

串联变压器与普通双绕组变压器类似，仅在线圈连接方式有区别。励磁变压器类似于低压线圈为调压线圈的特殊变压器，低压绕组为星形联结，并在中性点处连接有载开关。

2.2 线圈结构

由上述可知，该PST样机由串联变压器和励磁变压器组成。串联变压器为高－低结构，包含两个线圈，内层为低压线圈、外层为高压线圈。励磁变压器为高－调－调－高结构，包含4个线圈，从内至外分别为高压线圈2、调压线圈1、调压线圈2和高压线圈1。各变压器中的线圈排列如图4所示。

由图4可知，串联变压器包含四个出线端子，分别为a、x、S和L端，其中，a、x端为低压线圈出线端子，S、L端为高压线圈出线端子，并分别与系统的电源侧和负载侧相连接。此外，高压线圈中部经连接引线与励磁变压器高压线圈1相连。励磁变压器包含两个出线端子，分别为N、n端，均为变压器中性的端子。内层高压线圈2与外层高压线圈1相连，高压线圈1上下并联，中部与串联变压器高压线圈经连接引线相连。



（a）串联变压器　　（b）励磁变压器

图4 PST线圈排列

2.3 与常规产品的差异

与常规电力变压器相比，PST尤其是双心式移相变压器，在产品结构、运行方式以及试验等方面具有明显不同，主要体现在如下几方面：①PST由两台变压器组成，并通过特殊设计的连接盒连接在一起；②PST可以通过调整改变移相角，实现系统潮流的控制与调整；③PST出线端子较少，主要集中在串联变压器，而励磁变压器较少；④由于PST本身的结构特点，其试验方式与普通变压器具有明显不同。

3 雷电冲击试验研究

3.1 问题与局限

对于PST，尤其是双心式PST，由于变压器结构比较复杂，其雷电冲击试验接线方式与常规产品不同，属于特殊试验。对于双铁心式PST，制造过程中的试验问题是主要难点。主要体现在如下两个方面：①在试验过程中，需要将串联变压器和励磁变压器组装在一起，要求试验场地空间必须足够大。②由于国内对PST研究较少，在进行雷电冲击试验时，没有国家标准可参考，需要参考IEC标准，并结合本单位试验场地的实际条件，编制合适的试验方案。

3.2 产品试验方案

对于山东电力设备有限公司所研制的50 MV·A/220 kV双心式PST样机，在进行产品的雷电冲击试验时，考虑到产品结构型式和实际挂网运行接线方式，并根据IEC标准规定，编制试验方案。

主要试验设备有冲击电压发生器、截波装置、分压器和电阻器等，并按照如图5所示的接线方式进行接线。

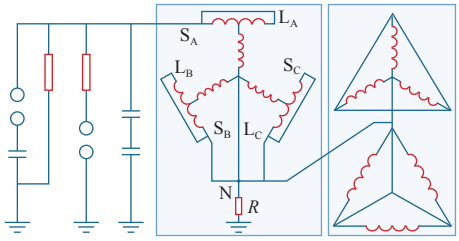


图5 PST雷电冲击试验接线

进行雷电冲击试验时，主要按照如下要求进行操作：①将串联变压器高压线圈L端和S端短接，对每一相单独进行特殊雷电冲击试验；②其余未试验端子通过电阻器（*R*）分别接地；③中性点端子通过分流器接地以便监测电流。

4 绝缘及过电压计算

对于双心式PST，由于产品结构的局限性，串联变压器和励磁变压器之间需要采用大量连接部件进行连接，在产品设计时，准确计算绕组内的雷电冲击电压分布和绕组之间的冲击电压传递变得非常困难。因此，选择合适的计算方法，获得准确的计算结果，对产品设计具有非常重要的意义。

为验证雷电冲击下，PST串联变压器和励磁变压器各线圈的绝缘强度，采用山东电力设备有限公司雷电冲击专用计算软件，对串联变压器和励磁变压器各线圈饼间、匝间以及线圈之间的冲击绝缘强度进行计算分析，验证产品结构绝缘强度可靠性，寻找产品结构薄弱点，为产品结构优化提供强有力的保障。

4.1 绝缘水平

计算时，按照PST雷电冲击试验操作流程和各个线圈的绝缘水平。对各工况下，PST串联变压器和励磁变压器的冲击电压进行计算分析。PST各线圈绝缘水平如表2所示。

表2 串联变压器和励磁变压器的绝缘水平

（单位：kV）

名称	线圈名称	全波	截波
串联变压器	高压	950	1 050
	低压	325	360
励磁变压器	高压1	325	360
	高压2	325	360
	中性点	325	–

4.2 计算模型

按照本台220 kV PST的相关设计图样，建立串联变压器和励磁变压器雷电冲击计算模型，如图6所示。计算时，各线圈之间连线、电压施加位置均按照雷电冲击试验流程。

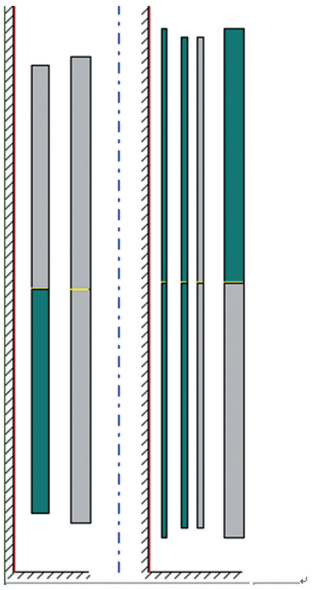


图6 PST计算模型

图6中，左侧为串联变压器，右侧为励磁变压器。按照表2所示的产品冲击绝缘水平，对最大、额定以及最小分接时，串联变压器和励磁变压器线圈的饼间、匝间及线圈之间的冲击电压、油道梯度电压及传递过电压等进行计算分析。

4.3 计算结果

经计算分析，在串联变压器高压线圈首端入全波950 kV时，即高压线圈S、L端入波，串联变

压器高压线圈中部将出现一个很高的过电压，并将通过串联变压器和励磁变压器之间的连线，传递到励磁变压器高压线圈1。各工况下，计算结果如表3所示。

表3 各工况下串联变压器高压线圈中部最大电压

序号	工况	电压百分比(%)	
		全波	截波
1	最大分接	140.63	49.53
2	额定分接	136.71	49.13
3	最小分接	127.91	46.37

由表3可知，串联变压器高压线圈中部最大电压出现在首端入全波时，工况为最大分接，该电压百分比为140.63%，电压值为1 335.99 kV。该电压水平已达到400 kV变压器绝缘水平，远高于220 kV变压器水平。而在线圈首端入截波时，高压线圈中部最大电压百分比仅为49.53%，远低于全波工况。

按照PST在系统运行的工作状态，分别计算最大分接、额定分接和最小分接三种极限工况下，PST串联变压器和励磁变压器各线圈之间、线圈内部的匝间和线饼之间的电压分布值。

4.3.1 串联变压器高压线圈

在串联变压器高压线圈首末端（S、L端），同时施加标准雷电冲击全波电压，冲击电压水平为950 kV，冲击电压参数波前时间为1.2 μs，半波峰时间为50 μs，采用变压器线圈波过程计算时，总计算时间按300 μs。

如图7和图8所示，在串联变压器高压线圈S、L端入全波950 kV时，高压线圈的中部线饼位置出现较大振荡，具体结果如下：①高压线圈首末端入波时，沿线圈首末端，各线饼的冲击电压呈先减小后增大的趋势，其中，线圈下半部分的减小和增大斜率大于线圈上半部分；②高压线圈的最大电压百分比为144.03%，对应电压值为1 368.28 kV，位于高压线圈下半部分第70段附近；③高压线圈中部位置，即串联变压器与励磁变压器连接引线位置，该电压百分比为140.63%，电压值为1 335.98 kV。

如图9和图10所示，在串联变压器高压线圈S、L端入全波950 kV时，串联变压器高压线圈中

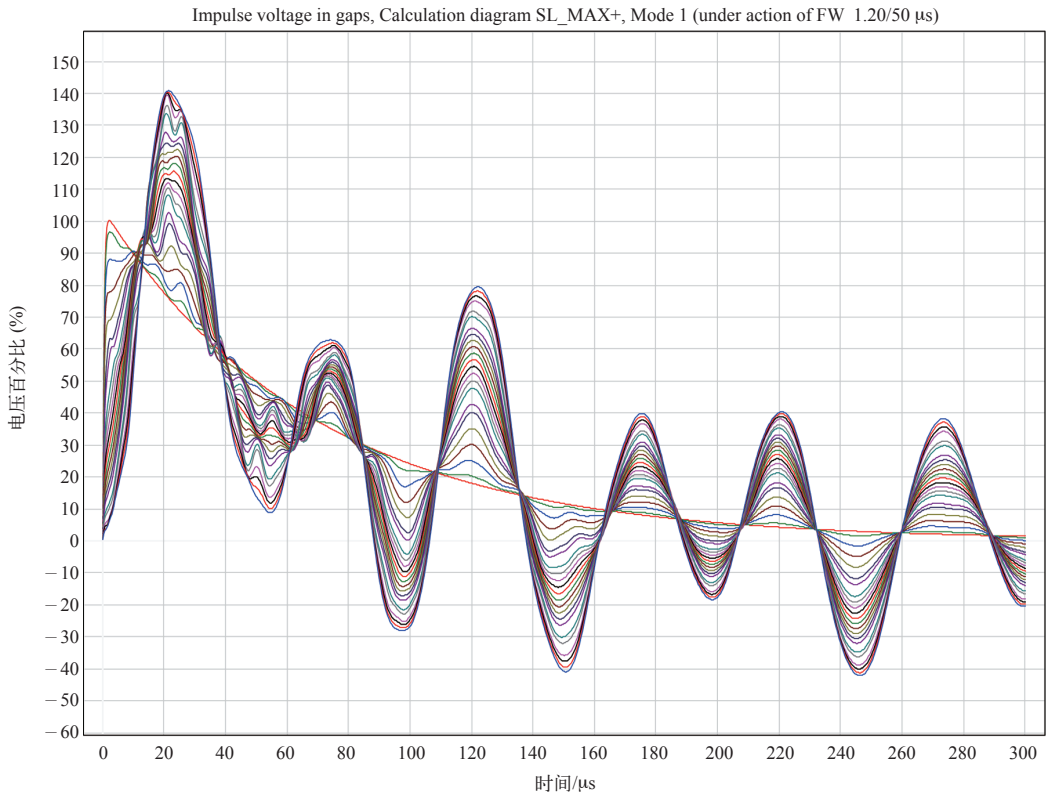


图7 串联变压器高压线圈冲击响应电压

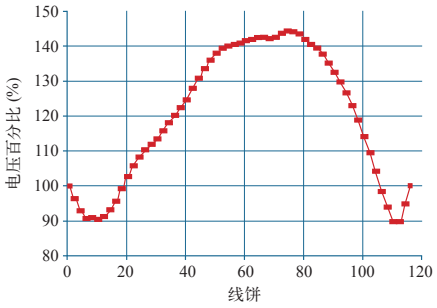


图8 串联变压器高压线圈最大电压分布

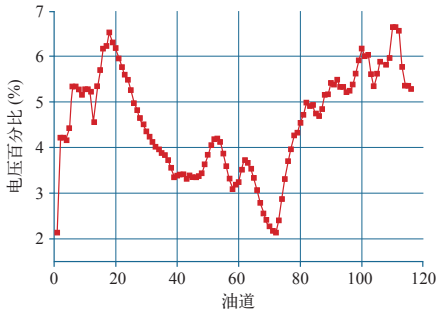


图9 串联变压器高压线圈梯度电压分布

油道梯度电压呈先增大后减小，再增大的趋势，具体如下：①高压线圈上半部分的最大油道梯度电压为6.52%，电压为61.94 kV，出现时刻为1.2 μs，位于线圈第18段附近油道；②高压线圈下半部分的最大油道梯度电压为6.64%，电压为63.08 kV，出现时

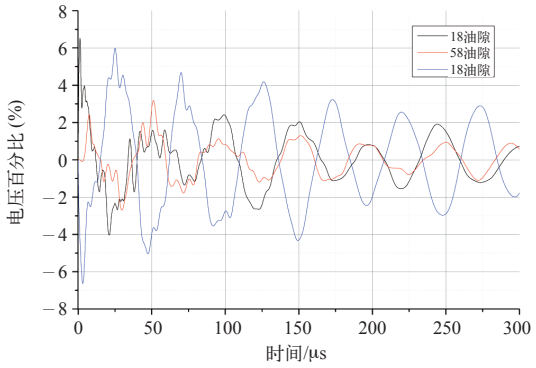


图10 串联变压器高压线圈部分油道梯度电压

刻为3.2 μs，位于线圈第110段附近油道，该数值同样为线圈最大油道梯度电压；③高压线圈中部，即串联变压器与励磁变压器连接引线位置，油道梯度电压为3.08%，出现时刻为25 μs。

4.3.2 励磁变压器高压线圈1

在串联变压器高压线圈首末端（S、L端），同时施加标准雷电冲击全波950 kV电压，励磁变压器高压线圈1经连接引线与串联变压器高压线圈相连，该高压线圈1的冲击电压波形及幅值由串联变压器高压线圈决定。

如图11和图12所示，在串联变压器高压线圈S、L端入波时，串联变压器高压线圈产生过电

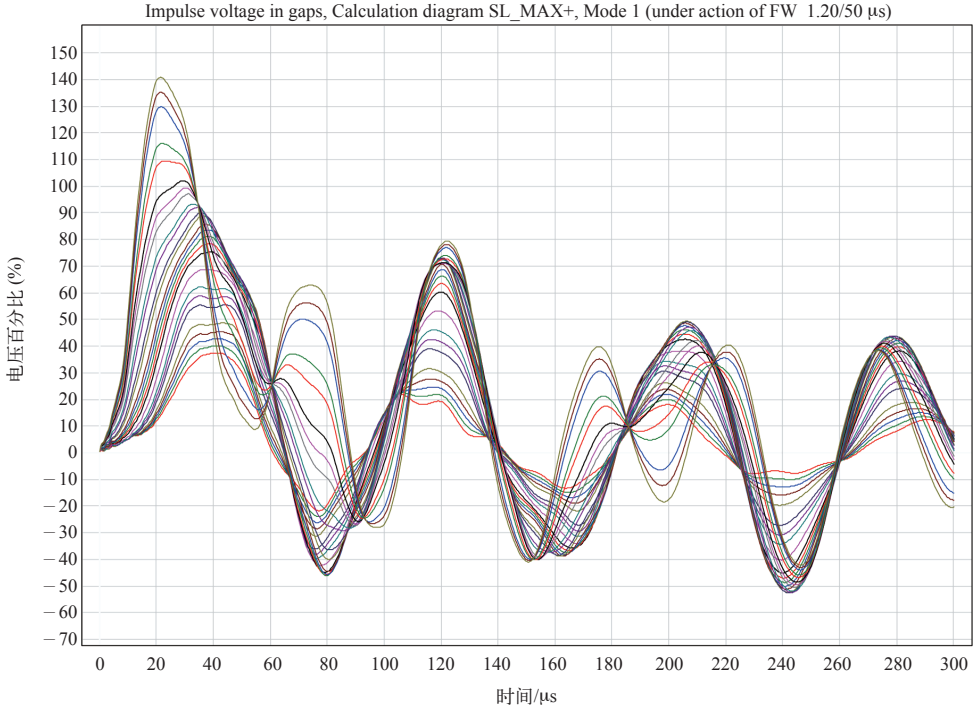


图11 励磁变压器高压线圈1冲击响应电压

压，经由串联变压器与励磁变压器之间的连接引线，传递到励磁变压器高压线圈1。①励磁变压器中，高压线圈1为中部出线，上下并联结构，在串联变压器高压线圈S、L端入波时，励磁变压器高压线圈1冲击电压峰值从线圈中部向上、下两端呈减小趋势；②高压线圈1中，最大峰值电压出现在线圈中部，该电压百分比为140.96%，对应电压值为1 339.11 kV；③高压线圈1中，最小峰值电压出现在线圈首、末端部，该电压百分比为37.44%，对应电压值为355.68 kV。

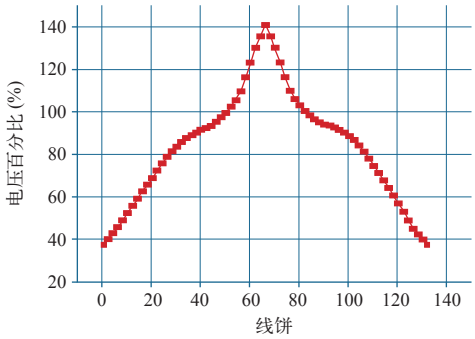


图12 励磁变压器高压线圈1最大电压分布

如图13和图14所示，在串联变压器高压线圈S、L端入全波950 kV时，励磁变压器高压线圈1中油道梯度电压呈先增大后减小的趋势，最大电压出现在第60段，具体如下：①高压线圈1上半部分的最大油道梯度电压为8.11%，电压为77.12 kV，出现时刻为45.8 μs，位于线圈第60段附近油道，该数值同样为线圈最大油道梯度电压；②高压线圈1下半部分的最大油道梯度电压为7.45%，电压为70.78 kV，出现时刻为73.6 μs，位于线圈第75段附近油道；③高压线圈1的最小梯度电压为3.17%，电压为30.15 kV，出现时刻为47.2 μs，位于线圈第1段附近油道。

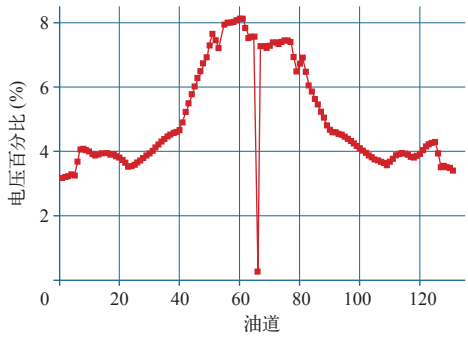


图13 励磁变压器高压线圈1梯度电压

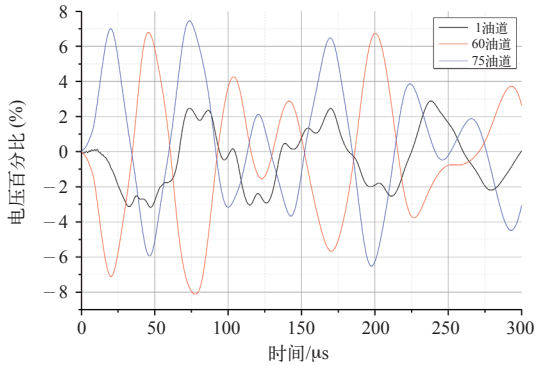


图14 励磁变压器高压线圈1梯度电压

4.4 小结

经计算分析，在串联变压器高压S、L端入全波950 kV时，串联变压器高压线圈中部出现一个较高的振荡过电压，并经由串联变压器与励磁变压器之间的连接引线传递至励磁变压器高压线圈1。经计算分析：①串联变压器高压线圈最大振荡过电压峰值为144.03%，为全波入波峰值的1.44倍，位于高压线圈下半部分；②串联变压器与励磁变压器连接引线最大振荡过电压为140.96%，为全波入波峰值的1.4倍；③其余线圈绝缘强度均满足要求。

因此，串联变压器高、低压线圈中部位置为线圈绝缘结构薄弱点，在产品绝缘结构设计时，需对产品的主纵绝缘进行计算分析，并采取合适措施进行加强，以防止绝缘损坏。

5 结束语

PST是一种特殊变压器，主要用于改善交流电网效率、提高传输能力，广泛应用于欧洲和北美地区。目前，双心式结构是PST最常用一种结构，其调压线圈不与系统直接相连，可用于高电压、大容量PST的设计。

本文以山东电力设备有限公司所研制的50 MV·A/220 kV双心式PST为研究对象，从PST类型、工作原理、结构型式和试验方法等方面进行分析，并采用雷电冲击专用计算软件，对该产品纵绝缘结构进行验证分析。

1）双心式PST的结构比较复杂，其雷电冲击

(下转第53页)

变压器复合绝缘缺陷多指标综合权重评估方法 [J]. 高电压技术，2015 (11)：3836-3842.

[3] 李军，董立文，赵红．油浸式变压器的老化和寿命评估 [J]．高电压技术，2007 (3)：186-187，189.

[4] Zheng Xu，Robert H Morris，Martin Bencsik，et al．Detection of virgin olive oil adulteration using low field unilateral NMR [J]．Sensors，2014 (14)：2028-2035.

[5] 张雅洁．电力用油劣化状态在线监测的核磁共振方法及传感器设计 [D]．重庆：重庆大学，2016.

[6] N'cho J S，Fofana I，Hadjadj Y，et al．Review of physicochemical-based diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers [J]．Energies，2016，9 (5)：367.

[7] Omar Hassan，Hossein Borsil，et al．Diagnostic of insulation condition of oil impregnated paper insulation system with return voltage measurements [C]．2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation And Dielectric Phenomena，2003：53-156.

[8] 刘刚．变压器油－纸绝缘状态诊断的回复电压法研究 [D]．重庆：重庆大学，2008.

[9] 廖瑞金，孙会刚，袁泉，等．采用回复电压法分析油纸绝缘老化特征量 [J]．高电压技术，2011 (1)：136-142.

[10] 林国梁，蔡金锭，李天友．变压器绝缘介质恢复电压的测量和研究 [J]．电力设备，2007 (10)：37-40.

[11] 申翰林．基于回复电压法的油浸式变压器状态检测关键技术的研究 [D]．成都：西南交通大学，2012.

[12] 高宗宝．基于回复电压法的变压器油纸缘状态研究 [D]．成都：西南交通大学，2011.

[13] Li Anna，Cai Jinding．Equivalent circuit parameter identification and aging assessment for oil-paper insulation [J]．IEEE Transactuins on Dielectrics and Elecreical Insulation，2014，21 (3)：1368-1375

[14] 段宗超，吴广宁，高波．油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究 [J]．电网技术，2014 (10)：2881-2887.

[15] 江贵贵．变压器油纸绝缘状态检测的回复电压法应用研究 [D]．广州：华南理工大学，2013.

（收稿日期：2017－04－08）EA

(上接第46页)

试验接线方式与常规产品不同，属于特殊试验，试验方法和试验场地空间问题是制造过程中的主要难点，需要制定完善的试验方案。

2）经雷电冲击计算可知，在串联变压器高压线圈S、L端施加全波冲击电压时，将在串联变压器高压线圈中部和励磁变压器高压线圈1中部产生一个较高的振荡过电压，其峰值电压为施加电压峰值的1.4倍。

3）本台变压器中，串联变压器高压线圈的最大油道梯度电压位于线圈下半部分，数值为6.64%（63.08 kV）；励磁变压器高压线圈1的最大油道梯度电压位于线圈上半部分，数值为8.11%（77.12 kV），按照以往类似电压产品的设计生产经验，绝缘结构均能满足要求。

综上所述，本台产品中，串联变压器和励磁变压器中各线圈的绝缘结构强度均能满足要求。此外，由于双心式PST绝缘结构的复杂性，在进行PST绝缘结构设计时，需要着重考虑该过电压对线圈内部线匝、线圈之间、油箱以及连接引线的影响，确保绝缘性能的可靠性。

参考文献

[1] 路长柏．电力变压器绝缘技术 [M]．哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1997.

[2] 李文平，陈志伟．出口美国大容量移相变压器的研究 [J]．电力设备，2007，8 (8)：21-23.

[3] 陈志伟，李志伟，李文平．浅谈大容量移相变压器的设计 [J]．变压器，2014，51 (2)：1-4.

（收稿日期：2017－05－03）EA