

变频串联谐振耐压技术在供配电系统中的应用

刘奉军, 陈文胜

上海宝冶集团有限公司, 上海 201900

摘 要 : 自电力工业快速发展以来, 供配电系统的稳定与安全运行一直是电力行业关注重点。随着技术的进步和电网规模的扩大, 对供配电系统的耐压测试提出更高要求, 传统耐压测试方法已难以满足现代电网的需求, 研究和应用新的耐压技术已势在必行。基于此, 介绍 VFSR 系列变频串联谐振成套试验装置, 并对实际使用中的问题进行分析处理, 以期供配电系统的耐压测试提供新的思路和方法。

关 键 词 : 串联谐振耐压技术; 设备容量计算; 电抗器匹配; 交流耐压试验

Application of variable frequency series resonance withstand voltage technology in power supply and distribution system

Liu Fengjun, Chen Wensheng

Shanghai Baoye Group CORP., LTD. Shanghai 201900

Abstract : Since the rapid development of the power industry, the stable and safe operation of the power supply and distribution system has been the focus of the power industry. With the advancement of technology and the expansion of the power grid, higher requirements are put forward for the withstand voltage test of the power supply and distribution system. Traditional withstand voltage test methods have been difficult to meet the needs of modern power grids. It is imperative to research and apply new withstand voltage technology. Based on this, this article introduces the VFSR series variable frequency series resonance test equipment, and analyzes and deals with problems in actual use, aiming to provide new ideas and methods for the withstand voltage test of the power supply and distribution system.

Keywords : series resonance withstand voltage technology; equipment capacity calculation; reactor matching; AC withstand voltage test

引言

2000年起国内诸多行业开始执行国际电工委员会 IEC60840 标准, 要求进行电缆主绝缘交流耐压试验。应宝钢能源部要求公司为确保宝钢“十一五”规划项目宝能变电所的中标, 满足 220kV 电压等级及以下的电气设备交流耐压需要, 并根据当时国家标准 GB50150-1991 预定修订的需要, 瞄准国际上电力电缆耐压试验的前沿技术, 根据宝钢宝能变初步设计, 成立了课题小组, 研究电力变频串联谐振耐压技术^[1]。

一、VFSR 系列变频串联谐振成套试验装置

VFSR 系列变频串联谐振成套试验装置采用调频调压方式, 可准确控制输出电压及频率, 以便对电气设备测试。该装置通过串联谐振回路, 利用较小的供电电源可完成等效于供电电源试验, 缓解现场试验电源的容量不足问题。VFSR 装置由变频电源主机、激励变压器、电抗器、电容分压器、补偿电容器及测试附件等核心组件构成, 各组件协同工作, 保证试验顺利进行。装置采用先进测量技术, 可对试验电压、电流、频率等参数测量, 通过内置的自动化控制系统, VFSR 装置可实现试验过程的自动化控制, 如自动调谐、自动升压、自动记录数据等功能, 提高试验效率。

VFSR 系列装置具备过压、过流、零位启动、系统失谐

(闪络) 等多重保护功能, 可保证试验过程中设备的安全。VFSR 系列装置主要用于对大容量、高电压的电气设备进行测试, 如交联聚乙烯电缆 (XPLE)、GIS、大型发电机组、电力变压器等。VFSR 系列装置还具备体积小、重量轻, 便于现场使用等优势, 装置采用先进的 IGBT 及驱动回路设计, 输出波形失真度小。通过变频技术实现精确的电压和频率控制, 降低了试验过程中的能耗, 多重保护功能确保试验过程中设备的安全, 降低了试验风险, 自动化控制系统使得试验过程更加简单快捷, 降低操作难度^[2]。

二、变频串联谐振耐压技术的特点

通过调节变频控制器的输出频率, 可使得谐振回路的电感与

被试品的电容相匹配，在较低的励磁电压下产生较高的试验电压。可满足不同电力设备对试验电压的需求，还使得试验过程高效。该技术还可根据被试品电容大小和试验要求，自动选择最佳谐振频率，提高试验准确性。传统工频试验变压器体积庞大、重量重，且大电流工作电源在现场不易取得，而变频串联谐振耐压试验装置采用串联谐振方式，减小试验装置体积及重量，便于携带使用。

该技术还可降低输入电源容量，减少能源消耗和试验成本。借助多级过流保护和过压保护等安全措施，可在试验过程中有效地保护被试品和试验设备安全。由于谐振回路本身具有良好的滤波作用，可减小电源波形中的谐波分量，从而输出良好的正弦波形，提高试验准确性。变频串联谐振耐压技术还可用于大容量、高电压的电容性试品的交接和预防性试验，如变压器、发电机组、GIS、电力电缆等，使得变频串联谐振耐压技术在电力设备测试领域广泛应用。

三、串联谐振耐压试验技术设备分析

（一）试验设备容量的选配

在选配试验设备容量前，要明确被试品的电容量。如宝钢湛江宝能变电所，220/110kV 300MVA的变压器，使用变频串联谐振试验进行交流耐压，测得变压器高压绕组连同套管对地电容18.38pF。

国标 GB50150-2016，《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》规定变压器试验频率为40Hz以上，由于变压器的铁芯是按工频50Hz制作的，实际耐压时试验频率需尽量接近50 Hz为宜。

根据串联谐振的条件 $X_L = X_C$ 即 $2\pi fL = 1/2\pi fC$

从而得到谐振频率： $f = 1/(2\pi\sqrt{LXC})$

被试物的电容量是一定的，要选配的就是电抗器及励磁变和操作箱。根据以上公式，频率在50 Hz时的电感量为：

$$L_{50} = 1/(4\pi^2 f^2 C) = 1/(4\pi^2 50^2 * 18380 * 10^{-12}) = 552H$$

为满足谐振频率的要求，所选电抗器的电感量宜在552H左右。由于试验用电抗器的电感量都是固定的，因此需利用已有的电抗器 YDCK-66/55，116H共五台来进行计算。

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LXC}) = 1/(2\pi\sqrt{580 * 18380 * 10^{-12}}) = 48.8Hz$$

另外，试验设备的容量必须满足试验的要求。在确定了试验电抗器的电感量后，根据公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LXC})$ ，可计算出试验频率， $I = 2\pi fCU$ 可以得到试验电流。根据这个电流和试验电压来选择试验设备。

$$I = \omega UC = 2\pi * 48.8 * 160 * 10^3 * 18380 * 10^{-12} = 0.9A$$

电抗器 YDCK-66/55的电流为1.2A，计算得出0.9A满足设备要求。

钢厂宝能变电所12根日本进口220kV交联聚乙烯电缆（每根长度2km，截面630mm²）的交流耐压试验，要求试验频率在30-300Hz，试验电压178kV。利用2台电抗器 YDTK-3000/250，1台电感量48H，两台并联使用电感量24H，额定电流24A，理论计

算频率为61.87Hz，试验电流19.1A，现场实际试验频率63.5Hz，试验电流19.8A，每根电缆的试验时间60min。选用的试验装置满足现场试验要求。

$$f = 1/(2\pi\sqrt{LXC}) = 1/(2\pi\sqrt{24 * 2 * 0.138 * 10^{-6}}) = 61.87Hz$$

$$I = \omega UC = 2\pi * 61.87 * 178 * 10^3 * 2 * 0.138 * 10^{-6} = 19.1A$$

天然气110kV变电所有两台110/10kV变压器，出线开关到1号变压器一次侧电缆为 YJLW03-Z64/110kV 长度35米，截面400mm²，到2号变压器一次侧电缆长度45米，截面400mm²。需要对电缆进行耐压试验，试验电压128kV，试验时间60min。按1号变压器电缆计算试验频率和试验电流，110kV 400mm²电缆的电容量为0.156μF/km，设备为3000/250kV，48H电抗器2台，根据公式 $f = 1/(2\pi\sqrt{LXC})$ 用一台电抗器时计算试验频率为311Hz，试验设备无法满足试验要求，把两台电抗器串联后电感量为96H，经计算试验频率为219.9Hz，试验电流0.9A满足试验设备要求和标准要求。

（二）试验频率的调整

在变频串联谐振耐压试验中，变压器、电容器等被试品与电感器、电容器等元件串联构成谐振回路。当试验频率与被试品的固有频率相匹配时，回路中的电流和电压将达到最大值，实现高效耐压试验，调整试验频率，可保证被试品在最佳谐振状态下进行测试，提高试验准确性。在谐振状态下，回路中的电流和电压相位相同，因此能量在电感器和电容器之间来回传递，不会造成额外的能量损耗。通过调整试验频率至谐振点，可最大限度地减小试验过程中的能量损耗，降低试验成本，提高试验效率。

不同类型的电力设备具有不同的固有频率和电气特性，对于大容量、高电压的电力设备，需要较低试验频率以减小电流和电压的波动，对于小容量、低电压的设备，需要较高试验频率以提高测试灵敏度。通过灵活调整试验频率，可保证不同类型被试品在最佳测试条件下进行测试，得到准确试验结果。在耐压试验过程中，过高的试验电压和电流会对被试品和试验设备造成损坏，引发安全事故。通过调整试验频率至合适的范围，可保证试验过程中的电压和电流在安全范围内波动，避免潜在安全风险。

（三）试验前接地检查

试验回路连接完成，在对高电压，长距离的电缆进行试验前，检查电缆的护层，交叉互联解开并连接，电缆对侧屏蔽可靠接地。被试电缆已安装到位，达到投运状态。试验一相时，屏蔽层连同其他两相屏蔽层、导体一起接地。对接地电阻的要求接地线要与接地体可靠连接，接地电阻小于4Ω^[3]。

案例：在钢厂某变电所进行110kV电缆耐压试验前，所有准备工作结束，接地确认无误，对电缆进行耐压试验，在对A、B两相耐压时没有异常现象，耐压电压128kV/1小时，试验电压、电流均正常。在对C相进行耐压试验时操作箱电压表有摆动现象，试验人员没有及时发现问题，待试验结束后发现电C相电缆有一处被烧穿。经检查发现屏蔽端接地不良，被试验人员碰掉，导致屏蔽接地不可靠，试验过程中电缆薄弱点长时间对地放电导致，经重新对电缆做中间头后再进行耐压试验后达到要求。

（四）对试验环境的要求

在实际现场试验中对试验环境要求比较高，被试物与周围物体有足够的安全距离，避免在升压过程中对地放电。最重要的是在电抗器下不能有铁板等物体，因试验时试验电压为变频电压，在周围产生磁场，如有铁板在试验时会产生涡流，随着试验电压的升高，涡流增加，电抗器发热，因试验时间长，电抗器为干式电抗器，本身试验电流和涡流叠加，使电抗器发热速度加快，最终使电抗器烧毁。

案例：在某钢厂进行35kV电缆耐压时，因未对试验环境进行确认，试验过程中电抗器突然发热冒烟，变频设备自动跳闸。对现场进行确认，电缆绝缘良好，排除电缆原因。再对试验设备进行检查发现一台电抗器断路，电抗器温度很高，查看设备接线均正确，接地良好，试验电压、试验电流均与理论计算吻合。事故原因无法判断，经与甲方人员沟通，甲方人员确认摆放电抗器下方有一块铁板，因埋在水泥下，试验人员无法看到导致事故发生，后更换电抗器摆放位置，耐压试验顺利结束^[4]。

四、变频串联谐振耐压技术及应用实例

经过前期对变频串联谐振耐压试验的研究，2006年GB50150-2006《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》的发布，经过十多年来在供配电系统工程不断的试验和按国标的执行试验标准，目前GB50150-2016《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》的标准已重新发布，按甲方要求对电缆耐压试验执

行电力系统标准，从10kV到220kV均应进行交流耐压试压，对变频串联谐振耐压装置进行了优化，按冶金工程项目对设备进行合理配置，目前冶金工程中下列设备基本能够满足现场施工调试需要，为在冶金行业领军地位打下基础。

在电力电缆的耐压试验中，由于电缆的电容量较大，传统工频试验变压器体积庞大、重量重，且大电流的工作电源在现场不易取得。而采用变频串联谐振耐压技术，通过调节试验频率，使得谐振回路在较低的励磁电压下产生较高的试验电压，实现对电力电缆的高效、可靠测试。变频串联谐振耐压技术还适用于发电机、变压器、GIS（气体绝缘开关设备）等高压电力设备的耐压试验。采用变频串联谐振耐压技术，可对设备在额定电压下的耐压试验，从而及时发现潜在的缺陷和故障，确保电力系统的安全运行。

五、结束语

经过前期的技术研发，并在后续工程中不断完善和提高，利用变频串联谐振设备对220kV及以下高压设备进行耐压试验是完全可行的。对于各类试验中遇到的问题，采用调整不同参数和容量的电抗器、励磁变、增加电容、调整回路的品质因数的方法都是行之有效的。目前已完全掌握变频串联谐振耐压技术，全面覆盖公司承揽的工程需要，今后将不断探索，提升技术能力，使其始终站在冶金系统供配电的前沿。

参考文献

[1] 马韬. 预防性交流变频串联谐振耐压试验探析 [J]. 数字传媒研究, 2024, 41(02):78-80.
[2] 冯相永, 贾会星, 李永泉, 等. GIS调频式串联谐振耐压试验方案研究 [J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2021, 34(01):22-25.
[3] 孙军威. 变频串联谐振电缆耐压的实际应用 [J]. 电工技术, 2020, (15):102-103+107.
[4] 任书燕, 董海庆. 变频串联谐振在变压器交流耐压试验中的应用 [J]. 机电信息, 2020, (09):3-4.