220 kV长距离电缆现场变频谐振耐压试验与分析

济南东部城区的市政工程220 kV新竣工电缆线路长达7.97 km，容量大，实施耐压试验所需试验设备的电源容量、最大输出总电流、重量以及组装工作的最小化总体要求高，这是济南首次开展如此长距离高电压等级的试验。对比了现有试验方法，采用串联变频谐振耐压试验方法，通过理论计算分析，根据现有条件提出了合理的试验方案并顺利实施。最后结合试验结果进行讨论，实践证明串联谐振法可行有效，对长距离电力电缆现场变频谐振耐压试验具有重要的参考价值。

杜思思　蔡　炜　王　伟　张雪峰/国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司

杜思思/工程师

关键词/Keywords

长距离电缆·
串联谐振·
耐压试验·
现场试验·

开展有效的电缆现场交接试验，可以最大程度上减小投运后发生故障的概率，保障电缆可靠投运和安全运行，但由于电缆容量大，长距离电缆更为突显，传统试验方法不能适应现场试验的要求。目前国内超长距离、高电压等级的线路交接试验开展并不多。

1）超低频（0.1 Hz）耐压试验方法被试品电缆在超低频与工频耐压下一致性较差，主要适用于中低压XLPE绝缘电缆耐压试验。

2）工频或接近工频的交流耐压试验最大困难是需要很大容量试验设备，设备重达十几吨，体积庞大，组装困难，难以满足现场试验要求。

3）变频谐振试验利用变频谐振的原理，使电源容量减少为试品容量的1/Q，设备的重量大大降低，使得高电压、长距离电缆的现场试验成为可能。同时试验频率和试验电抗器固定可调，增加了系统的柔性。

本文试品为7.9 km超长距离电缆，试验总体电流大，试验设备Q值要求高。针对上述问题，本文深入分析计算试验过程中可能遇到的问题；提出试验方案，根据试验结果对试验频率、试品长度等进行分析，具有重要的参考价值。试品是位于济南东部城区的市政工程线路，作者所在单位受委托顺利完成了本次现场交接试验，这也是济南首次实施如此长距离高电压等级的试验。

试验参数分析

1. 变频串联谐振的原理

电路输入端电压U与电流I同相，电缆串联谐振原理图如图1所示。

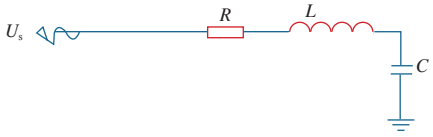

图1　串联谐振原理图

图1中，R为回路等效电阻，Ω；L为回路等效电感，H；C为回路等效电容，μF。

在正弦电压U作用下

$$Z = R + \mathrm{j}(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + \mathrm{j}(X_L - X_C) = R + \mathrm{j}X \tag{1}$$

式中，电抗$X = X_L - X_C$是角频率ω的函数，当条件满足$X_L - X_C = 0$或$X_L = X_C$即$\omega L = 1/(\omega C)$时，电路阻抗$Z(\omega_0) = R$为纯电阻，此时的工作状态称为谐振。串联电路中出现的谐振又称“串联谐振”。

谐振角频率

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow f_0 = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{2}$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

电路品质因数

$$Q=\frac{\omega_0 L}{R}=\frac{1}{R}\frac{L}{\sqrt{LC}}=\frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

谐振耐压试验就是通过改变试验系统的电感量和试验频率，使回路处于谐振状态，这样试验回路中试品上的大部分容性电流与电抗器上的感性电流相抵消，电源只提供回路中消耗的有功功率的能量。而试品C_X两端电压U_{CX}却为电源电压U_S的Q倍，即$U_{CX}=QU_S$。其中，Q为系统的谐振倍数，即电路的品质因数。

2. 试验参数

根据GB 50150—2006《电气装置安装工程设备交接试验标准》，220 kV电力电缆现场交流耐压试验电压要求为1.7倍额定相电压，频率为20～300 Hz，试验时间为60 min。试验方案原理图如图2所示。

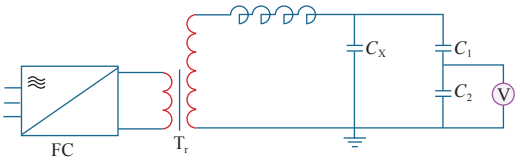

图2　试验方案原理图

图2中，FC为变频源；T_r为励磁变压器；L为电抗器；C_x为试品电容；C_1、C_2为高压分压器。

1）试品参数。规格型号：ZC－YJLW02－Z127/220 kV－1×2 500 mm^2，7 970 m。每千米电容量：0.235 2 μF/km。

2）试验电压。$U=1.7\times U_r=216$ kV。

3）电容量。$C_x=1.87$ μF。试品电容量较大，为使试验电流在可接受范围内，频率宜低，初步拟定为30 Hz。

4）30 Hz试验电压下最大总电流为

$$I_x=\omega C_x U=76.10\ \text{A}$$

5）励磁电压。串联谐振状态时，Q_0值大于40，$U_f>U/Q_0=5.4$ kV。

6）功率。$Q=15.82$ Mvar，$P=Q/Q_0=395.5$ kW。

通过上述计算结果可知，本次试验试品电容量很大，试验频率宜低，试验总电流很大，基本达到试验可实施的上限，Q值要求高。

3. 试品容升

依据GB/T 16927要求，交流耐压试验容升比不得超过±3%范围，因此，需要合理配置试验设备，降低试品容升。220 kV电缆线路交流耐压试验等效原理图如图1所示，试验时试品整体呈容性状态。

串联谐振频率为50 Hz时，$X_L=1.14$ Ω，$X_C=1\ 703$ Ω，容升电压比约为$X_L/X_C=0.07\%$；串联谐振频率为30 Hz时，$X_L=0.68$ Ω，$X_C=2\ 838$ Ω，容升电压比约为$X_L/X_C=0.024\%$。

根据理论计算，交流耐压试验频率在30～50 Hz范围时，容升电压比在0.024%～0.07%，符合GB/T 16927规定的±3%范围要求。因此，不需远端设立电抗器降低容升，但在升压的瞬间，过渡过程可能造成瞬间过电压，可以采用两端装设分压器监测，防止出现电压过高。

现场试验案例

1. 试验方案

由上可以看出，此次试验主要特点在于：①最大总电流较大，达到76.1 A；②试品电容量大，为1.87 μF。德国海沃RSE 400车载式串联谐振装置，试验车体积为16 m×2.5 m×4.1 m（长×宽×高），容量21 580 kV·A，最大输出电流83 A，频率范围20～300 Hz，设备试验电压基本达到要求上限，实物图如图3所示。

图3　试验车实物图

由于是车载式，试验设备重量远远小于组装试验设备的重要，现场组装工作也大大简化。因Q值较高，在现有环境温度条件下（温度：0～7 ℃，湿度：30%～50%），能够满足本次试验要求。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

根据现场测量结果，所需输入电源电流约为400 A。本次试验的电源车采用1 000 kV·A容量，电流接近1 100 A，现场另有5 000 W发电机一台，1 000 kV·A发电机组一台，符合试验要求。

2. 试验场地准备

1）试验导线一端和变压器（或电抗器）连接，另一端和被试品电缆终端上设备线夹连接，导线悬垂部分离地高度不得低于2 200 mm。高压接线方式如图4所示。

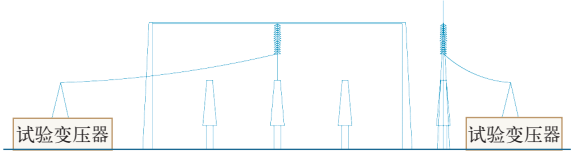

图4　高压接线

2）电源车容量为1 000 kV·A，试验车附近物体远离的距离为以车辆为中心半径5 m，如图5所示。

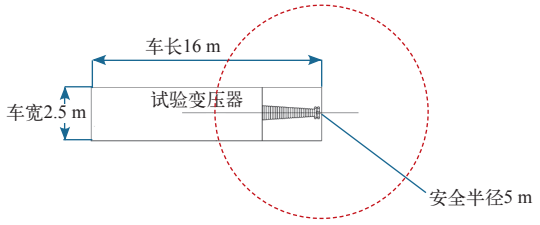

图5　试验车安全距离示意图

3. 试验实施

试验实施时，加压不宜过快，容易对试验设备产生影响，当试品发生击穿时，因失去谐振条件，高电压也立即消失，不利于记录试品击穿电压，太慢则影响试验进度。本方案实施步骤如下。

1）起动电源车，等待5 min后，打开试验设备电源开关。

2）起动升压，升压速度保持在10 kV/10 s，每升压10 kV停留30 s逐级升压，至试品终端电压达到216 kV。维持电压稳定，试验时间持续60 min。

3）检查设备各处，了解运行情况，检查设备频率变化情况是否满足要求。

4）试验完成后逐渐降压到零，放电后接地。

现场试验结果分析

试验过程数据截图如图6所示。

（a）正在升压状态　　（b）维持试验电压状态

图6　试验过程图

从图6可以看出，Q值较高为144，谐振频率最终稳定在28.97 Hz，接近拟定频率30 Hz；试验电流逐步上升至76.1 A，与理论计算相一致；首端加压值显示为224.4 kV，误差校正系数－4.3%，即首端实际电压值为224.4 kV×0.957＝214.7 kV，末端电压值为211.2 kV，误差校正系数为1.4%，即末端实际电压值为211.2 kV×1.014＝214.2 kV，容升符合规定的±3%范围要求。从计算值与实测值的对比看，数值非常接近。试验加压曲线图如图7所示。

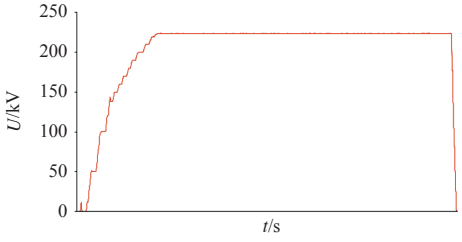

图7　试验加压曲线图

结束语

本文依据试验理论进行计算与分析，选择了合适的试验方案，结合试验结果分析，得出如下结论。

1）试验方法。实践证明串联谐振法对长距离高电压等级电缆是可行的，若想成功实施试验，关键在于合理的配置和选择现有试验设备，以期达到最佳的试验参数，提高试验系统的品质因数。根据GB 50150—2006标准所要求电缆竣工试验要求及项目，对上述电缆线路的现场试验，试

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

验结果表明该线路符合标准要求。

2）试验频率。综合国内外有关技术资料，选择合适的试验装置和工频试验变压器，使得试验设备的重量和频率范围合适是个比较重要的问题。从本次试验来看，电缆长度越长，电容量越大，所需输出电流越高，因此长距离电缆试验应尽量减小试验设备谐振频率，以降低试验电流。

3）试品最大长度。容量大是试品电缆最大的特点之一，在7.9 km长试品试验中，频率在30 Hz时，最大总电流已经接近试验设备的上限，若频率及单位电容量不变，采用本试验设备最大理论试验长度为8.67 m。

2013年12月3日～25日220 kV邢姚I线、220 kV邢姚Ⅱ线、220 kV姚文线和220 kV兴姚线等试验证明，本串联谐振耐压试验方案在长距离大容量电缆线路理论和现场试验方面均是可行实用的，对国内全面实施推广相关试验具有重要的意义。

参考文献

[1] 刘玮，肖勇．220 kV交联超长电缆现场交流耐压试验 [J]．高电压技术，2008，34 (4)：831-832.

[2] 王伟，李云财，马文月，等．交联聚乙烯（XLPE）绝缘电力电缆技术基础 [M]．西安：西北工业大学出版社，2005.

[3] 赵金明，段肖华．变频串联谐振技术在高压电缆交接试验中的应用 [J]．电网与清洁能源．2012，28 (4)：23-25.

[4] GB 50150—2006 电气装置安装工程——电气设备交接试验标准 [S]．北京：中国计划出版社，2006.

[5] GB/Z18890—2002 额定电压220 kV（U_m=252 kV）交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件试验方法和要求 [S]．北京：中国标准出版社，2002.

[6] GB/T 16927.2—2013 高电压试验技术 第2部分：测量系统 [S]．北京：中国标准出版社，2013.

（收稿日期：2014－04－21）EA

(上接第94页)

系统纹波电压较小，为12 mV。因此，采用磁反馈不仅能达到较好的静态特性，而且动态特性也较为出色。

图7为电源不同负载电流时的效率曲线，由曲线可知，电源能够达到85%以上的效率，最高可达到90.7%。

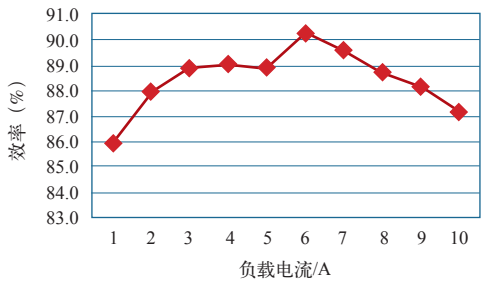

图7　效率曲线

结束语

设计了基于幅度调制磁反馈方式的有源钳位正激变换器，说明了其原理及工作过程。仿真和实验结果表明，磁反馈方式具有较高可靠性的同时能够达到良好的控制稳定性和静动态特性，适用于工作环境恶劣的场合；有源钳位正激电路能够有效降低开关损耗，效率可达90%以上。磁反馈方式的DC/DC变换器适合航天电源的应用。

参考文献

[1] 赵瑞杰，陶学军，田素立．新型有源钳位正激软开关变换器的研究 [J]．电子技术应用，2011，37 (11)：73-79.

[2] Harada K，Sakamoto H．Switched Snubber for High Frequency Switching [C]．IEEE Power Electronics Specialist Conference，1990：181-188.

[3] 彭国平，杨旭，鱼振民．有源钳位正激变换器的分析和设计 [J]．电工技术杂志，2003 (10)：29-33.

[4] 任红，罗浩，韩全胜，等．双电源转换开关电器的选择及应用[J]. 电气应用，2005 (8)：2-9.

（收稿日期：2014－04－29）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net