

# 适用于高压大容量设备的混联谐振组合拓扑及特征分析

雷 阳, 何信林, 李春丽, 王团结, 张 鹏, 杨世强, 史振利

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 高电压、大容量的阻容性电气设备交流耐压在工程中的应用场景十分丰富, 为了优化试验容量, 串并联混联谐振这一技术逐渐应用, 其思想为通过并联电感先与试品欠补偿, 使得混联后的谐振容量得以减小, 提高试验能力。面向混联谐振交流耐压这一实际问题, 研究了其拓扑组合, 在不同组合方式下讨论了谐振特征参数的计算并验证其合理性, 给出现场交流耐压试验的指导意见。

**关键词:** 混联谐振; 组合拓扑; 交流耐压; 谐振容量

## Hybrid resonant combination topology and characteristic analysis for high voltage and large capacity equipment

LEI Yang, HE Xinlin, LI Chunli, WANG Tuanjie, ZHANG Peng, YANG Shiqiang, SHI Zhenli

(Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The AC withstand voltage of high-voltage and high-capacity resistance capacitance electrical equipment has rich application scenarios in engineering. In order to optimize the test capacity, the technology of series parallel hybrid resonance is gradually applied. The idea is to reduce the resonance capacity after hybrid connection through the under compensation of parallel branch and test object. Facing the practical problem of hybrid resonant AC withstand voltage, this paper studies its topology combination, discusses the calculation of resonant characteristic parameters under different combination modes, and verifies its rationality, so as to give guidance for on-site AC withstand voltage test.

**Key words:** hybrid resonance; combined topology; AC withstand voltage; resonant capacity

## 0 引言

由于能源布局的特点, 输变电电气设备的高电压和大容量的特征明显, 而交流耐压试验是考察主绝缘强度的重要手段。

常规的交流耐压包含工频耐压、超低频耐压和变频谐振耐压。工频耐压不适用于大容量的阻容性设备; 0.1 Hz超低频耐压可适用于检测35 kV

以下的阻容性设备; 变频式谐振耐压通过电抗器灵活组合, 是高压、大容量电力设备绝缘检验的最佳选择<sup>[1-2]</sup>。

开展高电压、大容量设备的现场交流试验是一项“耗费”型的测试, 如何组合谐振拓扑、确保试验的进行需要科学和正确的指导。近年来, 一种混联谐振的思想已应用于现场工程, 即通过

并联电抗支路与试品的欠补偿,使得混联后的谐振容量得以减小<sup>[3]</sup>和混联后的系统特征发生变化,加之电抗器设备的阻值较高,如果忽略则会影响试验方案与结论。

本文面向高压电缆交流耐压的工程应用场景,提出了混联谐振的接线方式,并对其关键特征进行分析,在满足规程要求的前提下<sup>[4-5]</sup>,讨论了适合现场的最佳组合方式,提出指导性试验建议。

## 1 混联谐振耐压接线拓扑及原理

一种适用于串谐和混联谐振的接线示意图如图1所示。当 $n_1>0$ 、 $n_2>0$ 时为混联谐振;当 $n_1=0$ 、 $n_2>0$ 时为纯串联谐振。

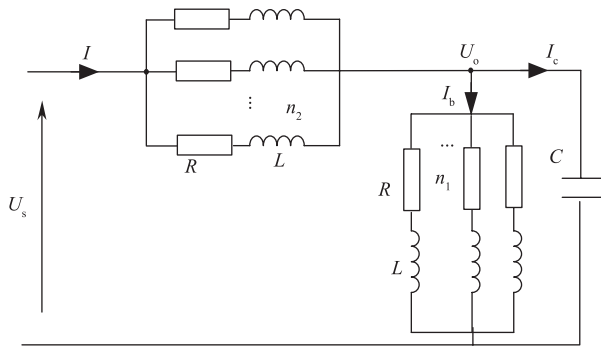


图1 谐振耐压电路图

Fig. 1 Diagram of resonance test

图1中, $U_s$ 等效为试验隔离变压器高压侧的电源电压; $I$ 为流过励磁变压器的高压电流; $L$ 为试验电感; $R$ 为试验电抗器等效电阻; $C$ 为试验设备电容; $n_1$ 表示并联支路的电抗器并联数量; $n_2$ 为串联支路的电抗器并联数量。试验回路等效为一个 $U_s$ 幅值、频率可调的电压源作用于谐振电路。

对于高电压、大容量的电力设备进行交流耐压,例如长距离的高压电缆,纯串联谐振接线会导致试验频率降低,容易跌至20 Hz以下,这是规程不可接受的范围。假如使用 $n_1$ 组电抗器的并联支路,以欠补偿形式补偿被试品 $C$ 上的部分容性电流,则可实现有效降容,再与 $n_2$ 组电抗器构成常规串联谐振耐压结构。

当 $n_1=0$ 时,图1所示的电路等效总阻抗为

$$Z_{\Sigma} = \frac{R + j\omega L}{n_2} + r + \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

式中, $\omega=2\pi f$ ,将式(1)虚部置0,求解后得到纯串联谐振下的谐振频率计算式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{n_2}}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

当 $n_1>0$ 时,图1所示的电路等效总阻抗为

$$Z_{\Sigma} = \frac{R + j\omega L}{n_2} + \left( \frac{1}{j\omega C} \right) // \frac{R + j\omega L}{n_1} \quad (3)$$

同理,得到此时的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_2 L^2 + 2n_1 L^2 \mp \sqrt{\sigma} - LCR^2}{2L^3 C}} \quad (4)$$

其中

$$\sigma = L^2 C^2 R^4 - 4n_1 L^3 C R^2 + 2n_2 L^3 C R^2 + n_2^2 L^4 \quad (5)$$

当 $\sqrt{\sigma}$ 的符号取正时,谐振为全局谐振点,即混联系统是在经 $n_2$ 支路欠补偿后得到串联型谐振点;当 $\sqrt{\sigma}$ 的符号取负时,谐振为局部谐振点,即混联系统是在 $n_2$ 支路与试验试品支路发生全谐振后得到并联型谐振点。

根据图1所示试验节点电流定理有

$$I + I_b = I_c \quad (6)$$

推导电流关系

$$I = U_o \omega C - \frac{n_1 U_o}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \quad (7)$$

通过式(7)可核算实际回路总容量。

## 2 谐振的分析与讨论

实验室通过搭建动模试验平台对串并联谐振的特征进行进一步讨论分析,搭建平台的主要设备信息如下。

### (1) 试验电抗

额定电压为30 kV;额定电感为36 H;电抗器直阻为141  $\Omega$ ;电抗器数量为8台。

### (2) 标准试品电容

额定电压为30 kV;额定电容为1  $\mu$ F。

按照标称电容的额定电压设计目标耐压值,频率合格范围设定为20~300 Hz,用8台电抗器分别组合来模拟多种串谐和混联谐振的测试场

景。同时，按照式（6）、式（7）计算支路电流判别容量限制，得到的结果和计算值比对见下表。

表 动模试验与计算结果  
Tab. Comparison between test and calculation

| 试验组合  |       | 实际测量                  |                      |      | 理论计算                  |                      |
|-------|-------|-----------------------|----------------------|------|-----------------------|----------------------|
| $n_1$ | $n_2$ | 谐振频率<br>$f/\text{Hz}$ | 输出电流<br>$I/\text{A}$ | 占空比  | 谐振频率<br>$f/\text{Hz}$ | 计算电流<br>$I/\text{A}$ |
| 0     | 8     | 76.4                  | 14.31                | 0.13 | 76.0                  | 14.39                |
| 1     | 7     | 76.5                  | 12.83                | 0.14 | 76.0                  | 12.68                |
| 2     | 6     | 76.6                  | 10.99                | 0.15 | 76.0                  | 10.97                |
| 3     | 5     | 76.7                  | 9.192                | 0.16 | 76.0                  | 9.26                 |
| 4     | 4     | 76.8                  | 7.42                 | 0.19 | 76.0                  | 7.56                 |
| 5     | 3     | 76.9                  | 5.54                 | 0.24 | 76.1                  | 5.86                 |
| 6     | 2     | 76.9                  | 3.71                 | 0.36 | 76.1                  | 4.13                 |
| 7     | 1     | 76.9                  | 1.85                 | 0.92 | 76.1                  | 2.41                 |
| 0     | 7     | 71.2                  | 13.35                | 0.13 | 71.0                  | 13.41                |
| 1     | 6     | 71.3                  | 11.72                | 0.14 | 71.1                  | 11.57                |
| 2     | 5     | 71.4                  | 9.73                 | 0.16 | 71.1                  | 9.73                 |
| 3     | 4     | 71.5                  | 7.83                 | 0.18 | 71.1                  | 7.90                 |
| 4     | 3     | 71.6                  | 5.9                  | 0.22 | 71.1                  | 6.07                 |
| 5     | 2     | 71.6                  | 3.95                 | 0.32 | 71.1                  | 4.22                 |
| 6     | 1     | 71.7                  | 2.05                 | 0.79 | 71.1                  | 2.40                 |

经对比，试验谐振频率与理论计算稍有出入，但误差均在1 Hz以内，电流测量值与计算值一致性较好，验证了混联谐振的理论分析。在上表所示的组合方式中，可以看出组合7、1（即 $n_1=7, n_2=1$ ）具有最小的回路损耗，但其占用的设备数量亦较大。

为讨论更多电容范围下各类组合对谐振频率的影响，将电容范围放在 $0.1 \sim 8 \mu\text{F}$ 观察谐振频率特征，图2展示了总数为8台的电抗器进行排列组合的所有情况，发现若要满足 $20 \sim 200 \text{ Hz}$ 的交流频率范围，8台电抗器的组合仅支持 $1.3 \mu\text{F}$ 以内的容值设备。经分析，在此试验设备的配置下，当电抗器数量有46台时，可以满足合格的试验频率范围，如图3所示。

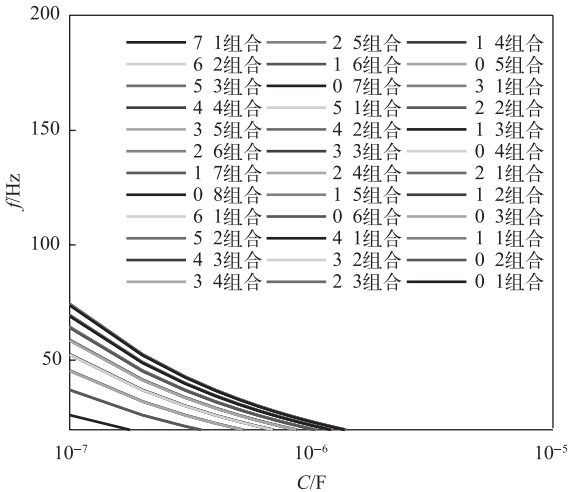


图2 8台电抗器组合下的谐振频率分布图  
Fig. 2 Diagram of resonant frequency under combination of 8 reactors

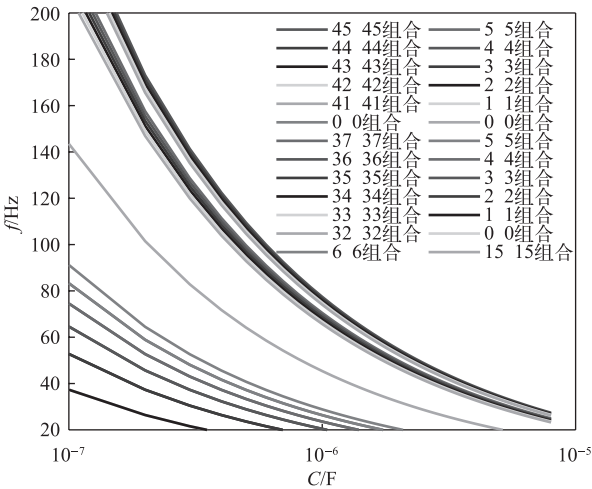


图3 46台电抗组合下的谐振频率分布图  
Fig. 3 Diagram of resonant frequency under combination of 46 reactors

3 混联谐振试验接线组合方案

综上所述，在优选混联谐振交流耐压接线组合前，对所有组合进行频率计算，首先筛选删去不符合频率要求范围的组合情况。如试品电容值参数 $C$ 过小，多种组合混叠在某一频段附近，应该尽量避免这一频率点附近的组合。

其次，在满足试验频带要求的情况下，须结合支路电流计算公式筛选超过试验系统容量（变频器容量、励磁变压器容量）的组合方式。

最后，再优选电抗器数量占用较小的组合

方式。现场的高电压、大容量混联谐振耐压可按照该顺序优选最佳接线方式，同时也得到了其次优选的备用方案，可最大程度地用于指导现场试验。

## 4 结束语

针对高电压、大容量的阻容性电气设备混联谐振耐压这一实际的工程问题，本文研究了拓扑组合，在不同组合方式下讨论了谐振特征参数的计算并验证其合理性。通过改变试验电抗器的组合，可扩展现有试验设备的能力，对今后全面混联谐振技术的推广相关试验具有重要的指导意义。

### 参考文献

- [1] 徐先勇，罗安，方璐，等．新型调频式谐振特高压试验电源的参数设计与实现[J]．中国电机工程学报，2009(10)：24-30．

- [2] 刘泽洪，韩先才，黄强，等．长距离，大容量特高压GIL现场交流耐压试验技术[J]．高电压技术，2020，46(12)：81-90．
- [3] 李乃一，孙翔，金涌涛，等．串并联混合谐振在500 kV海缆交流耐压试验中的应用[J]．高压电器，2020，56(10)：247-252．
- [4] 国家能源局．电力设备预防性试验规程：DL/T 596—2021[S]．北京：中国电力出版社，2021．
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部．电气装置安装工程 电气设备交接试验标准：GB 50150—2016[S]．北京：中国计划出版社，2016．

### 作者简介

雷阳（1993—），男，工学硕士，工程师，主要从事电气特殊性试验技术、发电厂网源协调稳定性的研究工作。

（收稿日期：2021-08-17）

## 新闻记者证公示信息

根据国家新闻出版署颁布的《新闻记者证管理办法》《国家新闻出版署关于开展2021年度新闻记者证核验工作的通知》（国新出发电[2022]3号）文件要求，我单位《电气应用》杂志已对换发记者证人员的资格进行严格审核，现将我单位拟换发新闻记者证人员名单进行公示，并接受社会监督，公示期20天（2022年4月20日至5月9日）。

姓名：史海疆

记者证号：K11524966000003

监督举报电话：010-88379714

国家新闻出版署监督举报电话：010-83138953

《电气应用》

# 适用于高压大容量设备的混联谐振组合拓扑及特征分析

P1

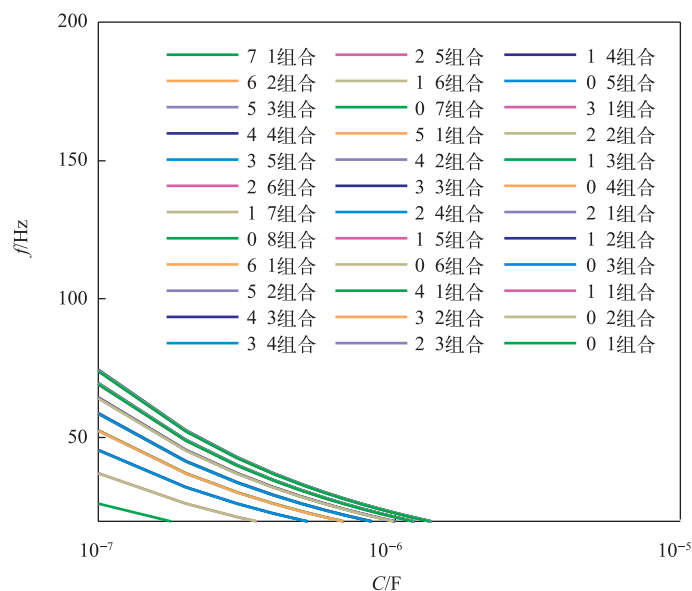


图 2 8 台电抗器组合下的谐振频率分布图

Fig. 2 Diagram of resonant frequency under combination of 8 reactors

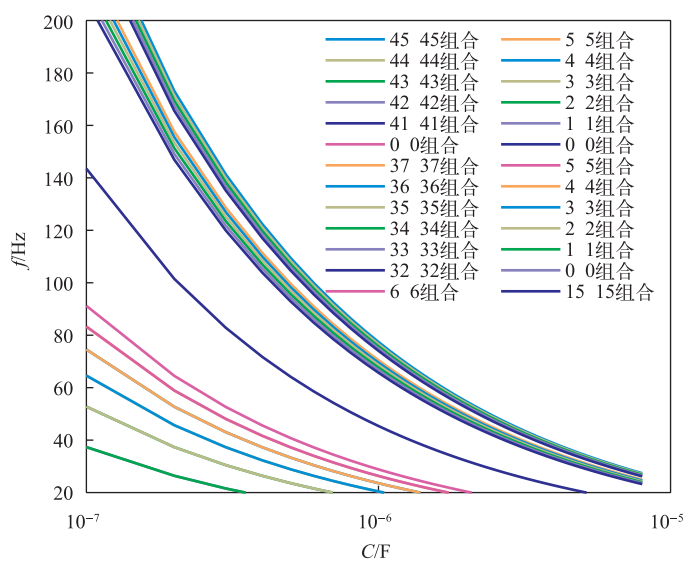


图 3 46 台电抗组合下的谐振频率分布图

Fig. 3 Diagram of resonant frequency under combination of 46 reactors