

ICS 29.240.01  
K 42  
备案号: 40049-2013

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1219 — 2013

---

## 串联电容器补偿装置 设计导则

Design guide for series capacitor installation

2013-03-07 发布

2013-08-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 2

4 缩略语 ..... 5

5 总则 ..... 5

6 型式与电气主接线 ..... 6

7 设计基本条件 ..... 6

8 基本设计 ..... 7

9 主设备及子系统基本要求 ..... 15

附录 A（资料性附录） 可控串补的特性 ..... 31

附录 B（规范性附录） 串补装置的仿真模型 ..... 33

附录 C（资料性附录） 典型串补装置工程的设备参数 ..... 35

附录 D（规范性附录） 晶闸管阀的损耗计算方法 ..... 44

附录 E（资料性附录） 串补装置的典型监控系统连接图 ..... 46

## 前 言

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业电能质量及柔性输电标准化技术委员会归口。

本标准主要起草单位：国网智能电网研究院、中国电力科学研究院、中国电力工程顾问集团东北电力设计院、国家电网公司华北分部、南方电网科学研究院、中国南方电网有限责任公司超高压输电公司百色局、中国电力工程顾问集团中南电力设计院、国网河南省电力公司电力科学研究院。

本标准主要起草人：戴朝波、林集明、班连庚、王宇红、李志国、刘连睿、李岩、姜宪法、胡玉峰、权白露、刘昊、王崇祐。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

## 串联电容器补偿装置 设计导则

### 1 范围

本标准规定了串联电容器补偿装置（简称串补装置）的型式与电气主接线、基本设计、设计原则及其条件，对串补装置主设备及子系统的性能和试验等提出基本要求。

本标准适用于 220kV～500kV 电压等级串补装置的基本设计及主设备和子系统的基本要求。

每个串补装置工程均有其特殊性，应结合具体工程条件和要求使用本标准。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 311.1 绝缘配合 第 1 部分：定义、原则和规则

GB 1094.1 电力变压器 第 1 部分：总则

GB 1094.5 电力变压器 第 5 部分：承受短路的能力

GB 1207 电磁式电压互感器

GB 1208—2006 电流互感器

GB 1984 高压交流断路器

GB 1985—2004 高压交流隔离开关和接地开关

GB 3096 声环境质量标准

GB 4208 外壳防护等级（IP 代码）

GB 11032—2010 交流无间隙金属氧化物避雷器

GB 12348 工业企业厂界环境噪声排放标准

GB 14598.27—2008 量度继电器和保护装置 第 27 部分：产品安全要求

GB/T 1094.4 电力变压器 第 4 部分：电力变压器和电抗器的雷电冲击和操作冲击试验导则

GB/T 1094.6—2011 电力变压器 第 6 部分：电抗器

GB/T 1094.10 电力变压器 第 10 部分：声级测定

GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 B：高温

GB/T 2423.3 电工电子产品环境试验 第 2 部分：试验方法 试验 Cab：恒定湿热方法

GB/T 4703 电容式电压互感器

GB/T 6115.1—2008 电力系统用串联电容器 第 1 部分：总则

GB/T 6115.2—2002 电力系统用串联电容器 第 2 部分：串联电容器组用保护设备

GB/T 6115.3—2002 电力系统用串联电容器 第 3 部分：内部熔丝

GB/T 8287.1—2008 标称电压高于 1000V 系统用户内和户外支柱绝缘子 第 1 部分：瓷或玻璃绝缘子的试验

GB/T 11022—2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求

GB/T 11287 电气继电器 第 21 部分：量度继电器和保护装置的振动、冲击、碰撞和地震试验 第 1 篇：振动试验（正弦）

GB/T 13498—2007 高压直流输电术语

GB/T 14285—2006 继电保护和安全自动装置技术规程

GB/T 14537 量度继电器和保护装置的冲击与碰撞试验

GB/T 14598.3—2006 电气继电器 第5部分：量度继电器和保护装置的绝缘配合要求和试验

GB/T 14598.9 量度继电器和保护装置 第22-3部分：电气骚扰试验 辐射电磁场抗扰度

GB/T 14598.10 量度继电器和保护装置 第22-4部分：电气骚扰试验 电快速瞬变/脉冲群抗扰度试验

GB/T 14598.13 电气继电器 第22-1部分：量度继电器和保护装置的电气骚扰试验 1MHz脉冲群抗扰度试验

GB/T 14598.14 量度继电器和保护装置 第22-2部分：电气骚扰试验 静电放电试验

GB/T 15291 半导体器件 第6部分：晶闸管

GB/T 17626.11—2008 电磁兼容 试验和测量技术 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

GB/T 17626.29—2006 电磁兼容 试验和测量技术 直流电源输入端口电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度试验

GB/T 19520.12 电子设备机械结构 482.6mm (19in) 系列机械结构尺寸 第3-101部分：插箱及其插件

GB/T 20995—2007 输配电系统的电力电子技术 静止无功补偿装置用晶闸管阀的试验

DL/T 365—2010 串联电容器补偿装置控制保护系统现场检验规程

DL/T 366—2010 串联电容器补偿装置一次设备预防性试验规程

DL/T 1010.5 高压静止无功补偿装置 第5部分：密闭式水冷却装置

DL/T 1193—2012 柔性输电术语

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

#### 3.1

**串联电容器补偿装置 series capacitor installation (SC)**

串联在输电线路中，由电容器组及其保护、控制等辅助设备组成的装置，简称串补装置或串补，主要有固定串联电容器补偿装置（简称固定串补）和晶闸管控制串联电容器补偿装置（简称可控串补）。

#### 3.2

**固定串联电容器补偿装置 fixed series capacitor installation (FSC)**

将电容器串接于输电线路中，并配有旁路开关、隔离开关、串补平台、支撑绝缘子、控制保护系统等辅助设备组成的装置，简称固定串补。

#### 3.3

**晶闸管控制串联电容器补偿装置 thyristor controlled series capacitor installation (TCSC)**

将并联有晶闸管阀及其电抗器的电容器串接于输电线路中，并配有旁路开关、隔离开关、串补平台、支撑绝缘子、控制保护系统等辅助设备组成的装置，简称可控串补。

#### 3.4

**晶闸管阀 thyristor valve**

晶闸管级的电气和机械联合体，配有连接、辅助部件和机械结构，它可与 TCSC 电抗器串联。

[DL/T 366—2010，定义 3.16]

#### 3.5

**(串补装置的) 额定频率 rated frequency**

$f_N$

串补装置所要安装的电力系统的额定频率。

#### 3.6

**短时过载 temporary overload**

在规定的环境温度范围内和额定频率时，串补装置的暂时（30min~8h）过载。

## 3.7

**暂态过载 dynamic overload**

在规定的环境温度范围内和额定频率时，串补装置的暂时（典型值为 10s）过载。

## 3.8

**光纤柱 optical fiber column**

用于串补平台与地面的测量、控制、保护设备之间的通信，以及送能光信号传输的设备，其绝缘水平与串补平台对地绝缘水平相同。

[DL/T 365—2010，定义 3.5]

## 3.9

**阀基电子电路 valve base electronics (VBE)**

处在地电位的电子电路，是控制系统与晶闸管阀之间的接口，简称阀基电子。

[DL/T 365—2010，定义 3.7]

## 3.10

**晶闸管阀避雷器 thyristor arrester**

一种用于将过电压限制在给定值以下的避雷器的组合体。在 TCSC 中，通常用于吸收能量并限制晶闸管阀两端电压在规定的保护水平。设计时，须保证晶闸管阀避雷器能承受晶闸管阀两端的持续运行电压和暂时过电压。

## 3.11

**电容电流 capacitor current**

$I_C$

流过串联电容器的电流。

## 3.12

**线路电流 line current**

$I_L$

流过线路的电流。

## 3.13

**(串补装置的) 额定电流 rated current**

$I_N$

串补装置在额定电抗 ( $X_N$ ) 和额定电压 ( $U_N$ ) 下能持续运行所对应的线路电流值 ( $I_L$ )。

## 3.14

**晶闸管阀电流 valve current**

$I_V$

流过晶闸管阀的电流。

## 3.15

**电容电压 capacitor voltage**

$U_C$

串联电容器组两端的电压。

## 3.16

**保护水平 protective level**

$U_{PL}$

电力系统故障时，过电压保护装置即将动作和动作过程中出现在串联电容器组上工频电压的最大峰值。

注：保护水平可用电容器组两端的实际电压峰值表示，也可用电容器组额定电压峰值为基准的标么值表示。

3.17

(串补装置的) 额定电压 **rated voltage**

$U_N$

串补装置能持续运行在额定电抗 ( $X_N$ )、额定电流 ( $I_N$ )、额定频率 ( $f_N$ ) 和正常环境温度范围内时的电容器组两端电压的工频分量。

3.18

控制角 **control angle**

$\alpha$

电容器电压  $U_C$  过零开始到晶闸管阀开始导通为止的电角度, 也称为触发角 (参见附录 A 中图 A.1)。

3.19

(可控串补的) 等效电抗 **apparent reactance**

$X(\alpha)$

晶闸管控制串联电容器的工频电抗, 是晶闸管触发角的函数。

[DL/T 1193—2012, 定义 4.4.5]

3.20

(可控串补的) 物理电抗 **physical reactance**

$X_C$

晶闸管阀处于闭锁状态且电容器电介质温度为 20℃ 时, 晶闸管控制串联电容器的单相工频电抗值。

[DL/T 1193—2012, 定义 4.4.7]

3.21

(可控串补的) 提升系数 **boost factor**

$k_B$

等效电抗  $X(\alpha)$  和物理电抗  $X_C$  的比值, 见式 (1) 为:

$$k_B = X(\alpha) / X_C \quad (1)$$

式中:

$X(\alpha)$  ——等效电抗;

$X_C$  ——物理电抗。

[DL/T 1193—2012, 定义 4.4.8]

3.22

(可控串补的) 导通角 **conduction interval**

$\sigma$

在一个周期内, 晶闸管阀处于导通状态所对应的电角度,  $\sigma = 2\beta$  (参见附录 A 中图 A. )。

注 1:  $\beta$  表示半导通角。

注 2: 改写 GB/T 13498—2007, 定义 7.25。

3.23

区内故障 **internal fault**

发生在装有串补装置的被保护线路部分的线路故障。

3.24

区外故障 **external fault**

发生在装有串补装置的被保护线路部分以外的故障。

3.25

最大摇摆电流 **maximum swing current**

电力系统大扰动后的暂态过程中振荡电流的最大值, 常以摇摆电流值 (A) 来度量, 并提供摇摆电

流随时间变化的曲线。

3.26

(串补装置的) 电压等级 **voltage class**

指串补装置所在线路的标称电压。

4 缩略语

BOD	Breakover Diode	击穿二极管
LTT	Light-Triggered Thyristors	光触发晶闸管
MOA	Metal Oxide Arrester	金属氧化物避雷器
MOV	Metal Oxide Varistor	金属氧化物限压器
POD	Power Oscillation Damping	阻尼功率振荡
RAM	Reliability, Availability, and Maintainability	可靠性、可用性和可维护性
RIV	Radio Interference Voltage	无线电干扰电压
SSR	Sub Synchronous Resonance	次同步谐振
SVC	Static Var Compensator	静止无功补偿装置
RMS	Root Mean Square	均方根

5 总则

5.1 串补装置的接入系统

5.1.1 当电力系统存在线路输送能力不足、稳定水平低、低频功率振荡、系统潮流分布不合理、三相潮流不平衡等问题，且在新架输电线路方案因线路走廊紧张、经济成本过高、破坏环境等原因难以实施的情况下，应在进行电力系统的潮流计算及稳定分析的基础上，综合比较不同方案的技术经济性，充分论证装设串补装置的必要性、可行性和经济性。

5.1.2 根据应用目标，应通过潮流计算、稳定分析和经济比较分析，确定装设串补装置的类型、安装地点、串补度和额定电流等。

5.1.3 应在确定串补装置的类型、基本功能、安装地点、串补度、分组情况、额定电流等基本设计原则与参数的基础上开展串补装置的系统设计。

5.1.4 当汽轮发电机组送出系统装设串补装置时，应分析 SSR 对装置选型与串补度的影响。

5.1.5 可控串补的接入系统应符合下列规定：

- a) 除提高线路输送能力和系统稳定水平之外，还要求实现降低电力系统中的汽轮发电机组次同步谐振/次同步振荡的风险、阻尼功率振荡、灵活平衡三相潮流等目标时，可考虑采用可控串补或可控串补与固定串补的组合。
- b) 应通过潮流计算和系统分析确定可控串补的基本串补度、额定电流、最大提升系数等参数。当可控串补用于暂态稳定控制时，应明确其相应强行补偿的投入策略、最大提升系数及持续时间；当可控串补用于阻尼电力系统低频功率振荡时，应确定其相应的控制策略及参数。
- c) 当可控串补用来抑制 SSR 时，系统分析宜采用详细的电力系统模型、可控串补模型和可控串补安装点附近的汽轮发电机模型（参见附录 B）。

5.2 串补装置的设计

5.2.1 应通过系统研究，比较不同设计方案的经济技术指标，确定串补装置的电气主接线、绝缘配合与过电压保护措施、主设备规范与控制策略等；应分析串补装置的接入对电力系统的潜供电流、线路断路器瞬态恢复电压、工频电压分布等系统特性的影响。

5.2.2 应在考虑技术可行性与经济成本的基础上，合理分配串补装置元件与子系统的可靠性指标，确保



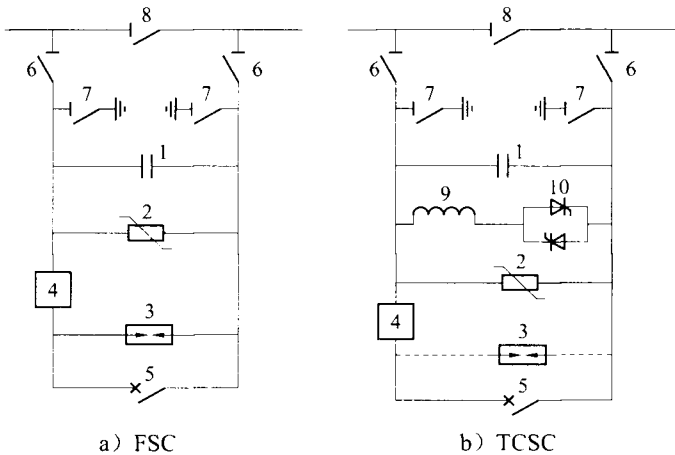
装置的运行可靠性水平。

5.2.3 串补装置的设计应能耐受用户规定的故障顺序性能要求。

5.2.4 串补装置的组成设备应满足相应设备标准所规定的性能要求，同时应能保证在安装点处的极端电气、电磁、自然环境下正常工作，可靠地实现串补装置的预定功能。

6 型式与电气主接线

串补装置主要有固定串补与可控串补两种基本型式，其典型电气主接线分别如图 1 a) 和图 1 b) 所示。



1—串联电容器组；2—金属氧化物限压器；3—间隙；4—阻尼装置；5—旁路开关；  
6—串联隔离开关；7—接地开关；8—旁路隔离开关；9—阀控电抗器；10—晶闸管阀

图 1 FSC 与 TCSC 的典型电气主接线图

采用 MOV 并联间隙保护时，保护水平的选择可基于系统故障时 MOV 电流的最大值，也可基于触发间隙的 MOV 电流整定值并考虑适当的裕度。

在系统故障期间，可控串补中的晶闸管阀可快速导通，旁路串联电容器组。应通过技术经济等方面的比较，确定可控串补是否采用间隙。

在阻尼装置的设计中，宜采用金属氧化物限压器串电阻器后再与电抗器并联的型式或间隙串电阻器后再与电抗器并联的型式。

典型串补装置工程的设备参数见附录 C。

7 设计基本条件

7.1 环境条件

- a) 海拔 (m)；
- b) 年均降雨量 (mm)；
- c) 最大月降雨量 (mm)；
- d) 年平均环境温度 (℃)；
- e) 最高环境温度 (℃)；
- f) 最低环境温度 (℃)；
- g) 最高气压 (kPa)；
- h) 最低气压 (kPa)；
- i) 年平均相对湿度 (%)；
- j) 最大相对湿度 (%)；
- k) 覆冰厚度 (mm)；

- l) 最大地面积雪厚度 (mm);
- m) 最大结霜厚度 (mm);
- n) 冻土层厚度 (m);
- o) 年平均风速 (m/s);
- p) 年最大风速 (m/s);
- q) 年平均雷电数 (次/年);
- r) 污秽等级及盐密 (级、 $\text{mg}/\text{cm}^2$ );
- s) 日照强度 ( $\text{W}/\text{cm}^2$ );
- t) 地电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ );
- u) 地震烈度 (度)。

## 7.2 系统条件

- a) 系统的电网结构和运行方式;
- b) FSC/TCSC 接入电网的等值;
- c) 系统负荷模型;
- d) 装置所在线路的标称电压及变化范围;
- e) 系统频率及变化范围;
- f) 电网谐波阻抗;
- g) FSC/TCSC 接入电网的过电压保护水平;
- h) 短路电流水平;
- i) 通过串补装置的最大摇摆电流及摇摆曲线;
- j) 相关保护定值以及故障切除时序。

## 7.3 其他条件

- a) 现有相关装置及设备 (应包括接地、防雷等);
- b) 站用电条件;
- c) 噪声水平要求。

# 8 基本设计

## 8.1 系统分析

### 8.1.1 分析目标

应针对电力系统的具体情况,通过对不同方案的技术经济指标的比较,确定串补装置的串补度(容抗)、额定电流、分组方案、分段方案、过电压保护措施、主接线方式以及主设备规范等。

### 8.1.2 分析内容

串补装置系统分析应包含下列部分或全部内容:

- a) 串补装置对潜供电流的影响;
- b) 补偿线路工频电压沿线分布;
- c) 串补装置对线路两侧断路器瞬态恢复电压的影响;
- d) 串补装置与高压并联电抗器的配置适应性;
- e) 串补装置基本设计和过电压保护控制;
- f) SSR 风险与抑制策略;
- g) 可控串补控制策略;
- h) 其他相关电磁暂态问题;
- i) 串补装置可靠性、可用性和可维护性 (RAM 特性)。

### 8.1.3 串补装置对潜供电流的影响

应建立线路、高压并联电抗器、串补装置、潜供电弧、线路继电保护装置、串补装置保护等电磁暂态模型。

应分析装设串补装置线路沿线不同位置发生单相接地时潜供电弧熄灭的电磁暂态过程。

可采取线路断路器与串补装置旁路联动等措施抑制潜供电流。

### 8.1.4 补偿线路工频电压沿线分布

应考虑线路的正序参数、零序参数、导线型号、导线分裂型式、塔杆尺寸、地线型号、接地方式、导线换位方式等因素的影响，建立导线的精确模型。

应考虑线路两侧高压并联电抗器及其中性点配置方式，详细分析在不同的系统母线电压、线路潮流以及串补装置在不同运行工况下输电线路沿线的电压分布情况。

当被补偿线路为同塔双回或多回线路时，应考虑双回线或多回线之间的耦合作用对线路工频电压沿线分布的影响。

### 8.1.5 串补装置对线路两侧断路器瞬态恢复电压的影响

应建立导线的频率相关模型、线路及母线变电站避雷器的模型。

应计及线路两侧的高压并联电抗器及其中性点配置方案的影响。

本项分析的主要内容是在不同的系统运行方式以及可控串补在不同工况下系统发生故障时线路断路器瞬态恢复电压的特性，应考虑下列因素：

- a) 故障前系统潮流和接线方式；
- b) 故障的形式，包括单相接地、两相接地、两相短路、三相短路；
- c) 故障的位置，包括线路沿线及串补装置所在变电站两侧；
- d) 线路沿线、变电站与串补装置所在变电站的接地电阻；
- e) 串补装置所在变电站的保护控制策略；
- f) MOA 配置参数；
- g) 故障时刻随机性的影响。

### 8.1.6 串补装置与高压并联电抗器的配置适应性

串补装置与高压并联电抗器典型配置方案及其特点如下：

- a) 串补装置安装于高压并联电抗器的线路侧。该方案具有改善沿线和母线电压分布等优点。为了限制潜供电流的低频暂态分量，应考虑采用保护联动策略，即线路的继电保护装置发出线路断路器跳闸信号的同时，命令串补装置旁路开关按相合闸。
- b) 串补装置安装于高压并联电抗器的母线侧。该方案具有限制潜供电流的低频暂态分量，便于潜供电流熄弧的优点，但不利于充分发挥串补装置改善沿线和母线电压分布的功能。

对于串补装置与高压并联电抗器的配置方案选择，必要时需经线路沿线电压分布、工频过电压、潜供电流、工频谐振过电压、断路器瞬态恢复电压、同塔双回线路间感应电压和感应电流等专题计算分析后确定，确保串补装置与高压并联电抗器的配置可满足各种方式的运行要求。

### 8.1.7 串补装置基本设计和过电压保护控制

串补装置基本设计与过电压保护控制的主要内容是建立串补装置所在电力系统及串补装置的电磁暂态模型，计算各种故障条件下串补装置主设备的工作条件，提出串补装置主设备的设备规范与过电压保护控制策略。

对于固定串补，宜采用 MOV 与间隙配合的方案作为串联电容器组的过电压保护方案。根据电容器耐受过电流及过电压的能力，串联电容器保护水平的范围宜为 2.0~2.5（标幺值），典型值为 2.3（标幺值）左右。区外故障时，由 MOV 限制电容器两端电压，不允许触发间隙；区内故障时，允许通过触发间隙旁路电容器组。旁路开关一方面应确保串补装置能顺利完成投退操作，同时也为间隙的游离提供必要条件。阻尼装置用于限制电容器的放电电流，防止装置在串联电容器组的放电过程中损坏。应比较

不同类型的阻尼电路对放电电流的阻尼效果，确定主接线方案与关键参数。

计算各种故障条件下串补装置主设备的工作条件，应提出绝缘配合方案、过电压保护控制策略与主设备的设备规范，形成串补装置的基本设计方案。

对于可控串补，在上述设计内容的基础上，还宜包括：

- a) 选择阀控电抗器的参数，确保在此参数下可控串补具有良好的控制稳定性和响应能力，且能避开二倍频、三倍频等谐振。
- b) 可控串补的运行特性曲线应保证可控串补的输出阻抗满足工程要求。
- c) 在过电压保护控制措施中，晶闸管应主动干预过电压保护过程。在此前提下确定可控串补的过电压保护控制方法及其保护定值。
- d) 当区外故障允许用晶闸管旁路串联电容器时，则在短路故障切除后，可控串补应立即切换至容性提升模式。

## 8.1.8 SSR 风险与抑制策略

### 8.1.8.1 SSR 风险分析

在电力系统中装设串补装置时，应对电力系统中汽轮发电机组发生 SSR 的风险进行分析。出现 SSR 的可能性及其严重程度主要与下列因素有关：

- a) 线路的串补度、系统电气谐振频率；
- b) 发电机组轴系的机械自振频率及其稳定性；
- c) 发电机及系统的电气阻尼特性和发电机组轴系的阻尼能力。

串补系统 SSR 问题的主要分析方法有频率扫描、时域仿真和特征值分析等。在建立电气系统、机械系统以及控制系统模型的基础上，分析由于故障或操作引起的机组轴系扭振的大小及收敛情况，判断 SSR 发生的风险和严重程度。

### 8.1.8.2 SSR 抑制策略

设计、规划阶段应首先考虑避免 SSR 风险的可行措施，必要的情况下可根据系统分析结果采用下列一种或多种 SSR 抑制措施，并应进行详细的分析和比较。可采用的 SSR 抑制措施包括：

- a) 装设可控串补；
- b) 装设 NGH-SSR 型阻尼器；
- c) 在电厂升压变压器中性点装设静止阻塞滤波器；
- d) 在发电机转子上装设极面阻尼绕组；
- e) 辅加励磁阻尼控制；
- f) SVC 式的 SSR 阻尼器等。

常用的 SSR 的检测和保护装置主要有：

- a) 扭应力继电器；
- b) 电枢电流继电器；
- c) 次同步电流继电器；
- d) 扭应力分析仪。

在检测到 SSR 后，上述保护装置的动作出口主要有告警、旁路串补装置、切机等。

装设可控串补是抑制 SSR 的有效措施之一。若系统机组存在 SSR 风险，应评估可控串补抑制 SSR 的可行性，并提出相应的控制策略。采用可控串补抑制 SSR 时应注意下述问题：

- a) 导通角不能太小，应使得  $X(\alpha) > (1.15 \sim 1.2) X_C$ ；
- b) 采用固定串补和可控串补组合时，可控串补部分比例不应过低；
- c) 适当的底层控制；
- d) 应对可控串补不同提升系数下机组轴系的扭矩波形进行对比，选择使发电机 SSR 问题得到较好抑制、发电机扭矩波形得到较快衰减的容抗提升系数作为其额定值；
- e) 抑制 SSR 的效果与发电机组轴系的自振频率、振型和阻尼等参数有关。

### 8.1.9 可控串补控制策略

#### 8.1.9.1 控制目标

TCSC 的控制器应能实现 TCSC 提高线路传输能力、优化系统潮流分布、提高电力系统的暂态稳定性、阻尼系统低频功率振荡、抑制 SSR 等控制目标。

TCSC 暂态稳定控制器设计应解决下列问题：

- 控制信号的选择，包括就地信号或远方信号；
- 故障切除后，电容的投入量、投入时间的最佳控制规律，开环控制或闭环控制的选择；
- 暂态稳定控制与 TCSC 工作能力及工作范围曲线的配合；
- TCSC 暂态稳定控制与其他暂态稳定控制（如切机、励磁控制等）的配合。

#### 8.1.9.2 阻尼功率振荡

阻尼功率振荡属于闭环阻抗控制，根据输电系统条件实时调节可控串补等效电抗以达到阻尼电力系统低频振荡的目的。当引入晶闸管阀旁路模式，用于阻尼功率低频振荡的可控串补等效电抗范围增加，阻尼功率低频振荡性能将会有显著提高。

当可控串补用于阻尼功率低频振荡时，应满足下面三个基本要求：

- POD 控制器应适应功率方向有变更的功率振荡，且不应受潮流平均值方向的影响；
- POD 控制器应适应系统发生大扰动工况，即 POD 控制器的输入和输出之间的相位差不应随功率振荡的幅度而变化；
- 在阻尼功率振荡时，可控串补控制系统应具有从容性提升模式到旁路模式和从旁路模式到容性提升模式的模式转换功能。

#### 8.1.9.3 多回线路上可控串补控制的相互影响

两回线路上各安装一套可控串补，当系统发生扰动时，这两套可控串补控制会有相互影响。为了减少多回线路上可控串补控制不利的相互影响，宜采用以下对策：

- POD 控制器采用相同的输入信号，即并行线路的潮流之和；
- POD 控制器应具有相似的动态特性；
- 当阻抗控制限幅后，控制器应具有相似的动态特性和响应；
- 可控串补在最大提升系数时所对应的串补度不应大于在系统分析时所允许的串补度。

#### 8.1.9.4 分层控制原则

为实现可控串补控制器的不同控制目标，在控制器的设计中可采用分层控制结构。每层控制具有不同的输入量、响应时间和控制目的，不同的控制层之间既有主从性，又有一定的独立性，相互配合以完成特定的控制目标。

#### 8.1.9.5 上层控制

上层控制即电力系统控制，取系统变量作为控制输入量，根据系统运行要求发出潮流控制、暂态稳定控制、阻尼低频功率振荡等系统控制命令，上层控制的响应时间为 30ms~600ms。上层控制策略的制订需确定电力系统典型运行方式，并分别对正常方式、故障方式、事故后方式等状态提出电力系统对可控串补的不同动作要求。

#### 8.1.9.6 中层控制

中层控制即阻抗控制，其主要功能是根据系统控制的要求给出阻抗控制命令。中层控制的响应时间为 30ms~100ms。

中层控制可结合暂态稳定控制与阻尼控制的功能。在电力系统暂态过程中，可控串补暂态稳定控制环节宜先动作，通常在短路故障被切除后将可控串补的等值容抗调到允许最大值，提供强行补偿功能。补偿持续一定时间后，暂态稳定控制环节退出，转移到阻尼低频振荡控制环节。暂态稳定控制策略的确定应通过暂态稳定计算，选择强补投入时刻、最大提升系数及其持续时间等参数。

阻尼低频振荡控制环节采用系统状态量作为输入信号，通过调节可控串补的触发角实现其等值容抗的平滑调节。根据输入量的不同，可控串补线性控制部分可有功率控制、电压控制、功率电压混合控制

等三种实现方式。应对不同控制方法对应的系统振荡频率及阻尼比进行比较，选择效果最优者作为可控串补的中层控制策略。

#### 8.1.9.7 底层控制

底层控制取电容电流、电容电压、线路电流等可控串补模块自身变量作为控制输入，实现对晶闸管的触发控制，响应时间在 10ms 以内。底层控制还应实现可控串补的模式转换功能。在可控串补底层控制中采用适当的控制策略可有效抑制 SSR。

#### 8.1.10 其他相关电磁暂态问题

根据被补偿系统的特点与工程的要求，在系统分析中还应涉及下述部分或全部相关电磁暂态问题：

- a) 串补装置接入对线路继电保护的影响；
- b) 串补装置接入对线路不平衡度的影响；
- c) 可控串补接入对系统谐波的影响。

#### 8.1.11 串补装置可靠性、可用性和可维护性

##### 8.1.11.1 一般规定

可包括下列内容：

- a) 串补装置的可靠性设计；
- b) 串补装置的可靠性水平预测；
- c) 串补装置检修方案、维护规程的制定；
- d) 串补装置的可靠性指标统计。

##### 8.1.11.2 分析方法

串补装置的 RAM 特性分析方法主要有网络法（或称方块图法）、状态空间法、蒙特卡罗法、故障树分析法、灵敏度分析法，故障模式及后果分析，故障模式、后果和危害性分析等，应根据串补装置 RAM 特性研究的具体内容和目的来选择适当的分析方法。

##### 8.1.11.3 可靠性要求

衡量串补装置可靠性水平的指标主要有强迫停运发生率、强迫停运率以及可用率等。在通常情况下，串补装置的主要可靠性指标应满足：

- a) 年强迫停运发生率不超过 1 次；
- b) 强迫停运率低于 1%；
- c) 可用率不低于 99%。

## 8.2 损耗评估

在串补装置设计的运行范围内，对串补装置在不同运行方式下的总损耗分别计算并取平均值作为最终计算结果。在损耗评估中，母线、电缆等的损耗没有包括在内，并忽略了与谐波电流相关的损耗。可根据下列公式计算串补装置总损耗的估计值或保证值。

- a) 可控串补的晶闸管阀损耗  $P_v$  见附录 D。
- b) 电抗器损耗  $P_L$  可用式（2）计算：

$$P_L = 3R_L I^2 \quad (2)$$

式中：

$R_L$ ——电抗器的直流电阻值，可从电抗器的试验报告中查到；

$I$ ——流过电抗器的电流。

- c) 电容器组损耗  $P_C$  可用式（3）计算：

$$P_C = Q_C \tan \delta \quad (3)$$

式中：

$Q_C$ ——电容器容量；

$\tan\delta$ ——电容器介质损耗角正切值，可从试验报告中查到，在损耗计算中取所有电容器介质损耗角正切值的平均值；另外，对于内熔丝电容器，还应标明其损耗。

d) 串补装置其他设备的损耗，包括 MOV、间隙、冷却系统等设备或子系统的损耗功率，可通过生产厂家提供的相关数据获得。

对固定串补，用式（4）来计算其总损耗：

$$P_{FSC}=P_C \tag{4}$$

对可控串补，用式（5）来计算其总损耗：

$$P_{TCSC}=P_V+P_L+P_C \tag{5}$$

8.3 噪声

串补装置的限流阻尼电抗器、可控串补的阀控电抗器和晶闸管阀等设备的可听噪声排放应符合相关设备标准的规定。串补装置的场界处可听噪声水平应控制在昼间 55dB、夜间 45dB 范围之内。如串补装置附近有噪声敏感区域，应根据 GB 3096 确定声环境功能区类型，执行 GB 12348 规定的噪声排放限值。

8.4 故障顺序性能要求

串补装置的设计应能耐受工程要求的电力系统故障、暂态过载、短时过载和持续运行等顺序事件。这些顺序事件构成串补装置全部设备设计所要求满足的故障顺序性能要求。这些顺序性能要求应与发生区内故障和区外故障时电力系统的行为一致。应明确电力系统故障时保护正常动作和保护拒动时的串补装置故障顺序性能要求，同时也应明确电力系统故障类型。串联电容器宜在线路自动重合闸成功后重投。

应提供串补装置接入电网的等值系统，在该等值系统上进行区内故障和区外故障等研究，确定串补装置的设备规范。

尽管本条着重电力系统故障时的故障顺序性能要求，但串补装置还应满足工程其他要求情况下串补装置投入和串补装置重投等操作的顺序性能要求。

应明确规定串补装置的故障顺序性能要求，表 1～表 8 给出了 500kV 系统的典型故障顺序性能要求。表 1～表 8 中约定电力系统发生短路故障时，线路主保护动作切除故障时间为 100ms，相应断路器失灵切除故障时间增加 350ms。在实际系统中，故障的持续时间与断路器失灵故障切除时间会与上述的示例时间存在差异，其故障顺序性能要求应参照表 1～表 8 对故障后时刻进行必要调整。

表 1 区外发生单相永久故障时典型的可控串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀应闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投
100	通过线路断路器切除故障	
100~1000	功率通过输电线路	电流通过串联电容器，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀应闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投
1000	线路断路器重合于故障	
1000~1000+100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀应闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投

表 1（续）

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
1000+100	线路断路器三相跳闸， 但单相拒动	
1100~1100+350	故障持续	MOV 按要求动作，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀可闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投
1100+350	故障切除	

表 2 区外发生多相故障时典型的可控串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀可闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投
100	线路断路器动作切除故障， 但单相拒动，且单相 故障未消除	
100~100+350	单相拒动	MOV 按要求动作，间隙（如有）、旁路开关不允许动作。当检测到很高的瞬时电流（超过正常运行范围）时，晶闸管阀可闭锁或旁路串联电容器。当线路电流下降到装置正常运行范围后，串联电容器应尽快重投
100+350	故障切除	

表 3 区内发生单相永久故障时典型的可控串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，允许间隙（如有）动作，允许晶闸管阀旁路串联电容器，允许旁路开关动作
100	线路断路器动作切除故障	
100~1000	单相线路断开	旁路开关合闸，闭锁晶闸管阀。故障切除后 500ms 允许旁路开关分闸
1000	重合闸动作，重合于故障	
1000~1000+100	故障持续	MOV 按要求动作，允许晶闸管阀旁路串联电容器，允许旁路开关动作
1000+100	断路器三相跳闸， 但单相拒动	
1100~1100+350	故障持续	MOV 按要求动作，允许晶闸管阀旁路串联电容器，允许旁路开关动作
1100+350	故障切除	电容器仍处于旁路状态，直到旁路开关分闸



表 4 区内发生多相故障时典型的可控串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，允许间隙（如有）动作，允许晶闸管旁路电容器，允许旁路开关动作
100	线路断路器动作切除故障， 但单相拒动	
100~100+350	单相故障继续存在	MOV 按要求动作，允许间隙（如有）动作，允许晶闸管旁路电容器，允许旁路开关动作
100+350	故障切除	电容器继续处于旁路状态，直到旁路开关分闸

表 5 区外发生单相永久故障时典型的固定串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙、旁路开关不允许动作
100	通过线路断路器切除故障	
100~1000	功率通过输电线路	电流通过串联电容器，间隙、旁路开关不允许动作
1000	线路断路器重合于故障	
1000~1000+100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙、旁路开关不允许动作
1000+100	线路断路器三相跳闸， 但单相拒动	
1100~1100+350	故障持续	MOV 按要求动作，间隙、旁路开关不允许动作
1100+350	故障切除	

表 6 区外发生多相故障时典型的固定串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，间隙、旁路开关不允许动作
100	线路断路器动作切除故障， 但单相拒动，且单相 故障未消除	
100~100+350	单相拒动	MOV 按要求动作，间隙、旁路开关不允许动作
100+350	故障切除	

表 7 区内发生单相永久故障时典型的固定串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，允许间隙动作，允许旁路开关动作

表 7（续）

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
100	线路断路器动作切除故障	
100~1000	单相线路断开	旁路开关合闸。故障切除后 500ms 允许旁路开关分闸
1000	重合闸动作，重合于故障	
1000~1000+100	故障持续	MOV 按要求动作，允许旁路开关动作
1000+100	断路器三相跳闸， 但单相拒动	
1100~1100+350	故障持续	MOV 按要求动作，允许旁路开关动作
1100+350	故障切除	电容器仍处于旁路状态，直到旁路开关分闸

表 8 区内发生多相故障时典型的固定串补故障顺序性能要求

故障后时刻 ms	系统扰动事件	串联电容器保护/系统操作
0	故障发生	
0~100	故障持续	MOV 按要求动作，允许间隙动作，允许旁路开关动作
100	线路断路器动作切除故障， 但单相拒动	
100~100+350	单相故障继续存在	MOV 按要求动作，允许间隙动作，允许旁路开关动作
100+350	故障切除	电容器继续处于旁路状态，直到旁路开关分闸

9 主设备及子系统基本要求

9.1 电容器

9.1.1 一般规定

串补装置宜采用内熔丝或无熔丝结构的电容器。无熔丝电容器组可采用分支型接线方式，内熔丝电容器组可采用 H 型接线方式。电容器内部应配有放电电阻，保证在 10min 内将电容器的电压自额定电压峰值降低到 75V 或者更低。

对于内熔丝电容器，最大允许并联台数由单台电容器的耐爆容量决定。多台电容器并联时，对故障电容器的放电能量不应大于电容器的耐爆容量。

串补装置宜采用双套管电容器。

9.1.2 额定电压与绝缘介质强度

尽管额定电压和端子间绝缘介质强度不存在必然的确定关系，但是对端子间绝缘介质强度的要求可根据额定电压和极限电压提出。

9.1.3 电容偏差

可将电容器单元在相间作适当分配以减小线路三相容抗的不平衡度。在参考温度下，电容与额定电容的偏差不应超过下列限值。

- a) 对电容器单元：±3.0%；
- b) 对电容器组：±3.0%；
- c) 电容器组中任何两个相间的电容偏差不应大于 1.0%。

#### 9.1.4 试验

##### 9.1.4.1 例行试验

- a) 电容值测量 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.3 进行);
- b) 电容器损耗测量 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.4 进行);
- c) 端子间电压试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.5 进行);
- d) 端子与箱壳间交流电压试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.6 进行);
- e) 内部放电装置试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.7 进行);
- f) 密封性试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.8 进行);
- g) 内熔丝放电试验 (按照 GB/T 6115.3—2002 中 3.1.2 进行)。

注: 无熔丝电容器也应做放电试验, 以便验证其内部连接。

例行试验可不按上述试验顺序进行。电容器单元在发货前都应进行例行试验。

##### 9.1.4.2 型式试验

- a) 热稳定试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.9 进行);
- b) 端子与箱壳间交流电压试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.10 进行);
- c) 端子与箱壳间雷电冲击电压试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.11 进行);
- d) 冷工作状态试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.12 进行);
- e) 放电电流试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.13 进行);
- f) 内熔丝的隔离试验 (按照 GB/T 6115.3—2002 中 3.2.3 进行);
- g) 打开外壳后的内熔丝电压试验 (按照 GB/T 6115.3—2002 中 3.2.4 进行)。

应进行型式试验以验证电容器满足合同中规定的性能和本标准规定的运行要求。

没有必要在同一台电容器中进行所有的型式试验。

可不按上述试验顺序进行型式试验。

除非另有规定, 型式试验所采用的电容器样品应先通过所有的例行试验。

##### 9.1.4.3 选项试验

耐久性试验 (按照 GB/T 6115.1—2008 中 5.14 进行)。

只有在协商一致后才进行耐久性试验。

#### 9.2 晶闸管阀

##### 9.2.1 基本技术要求

- a) 晶闸管阀结构的设计方案应便于对晶闸管阀的近距离巡视、日常维护、故障处理与元件更换;
- b) 阀元件应根据系统故障和操作引起的最大过电压和过电流进行设计;
- c) 考虑到晶闸管电压分布的不均匀性, 应确保串联晶闸管级的最小冗余数为 1;
- d) 应通过设计使晶闸管阀具备防止误通或耐受误导通冲击的能力;
- e) 应为晶闸管阀提供正常触发和强制触发两个独立的触发系统;
- f) 晶闸管的基本技术要求应参照 GB/T 15291 的相关条款。

##### 9.2.2 过电压保护

- a) 晶闸管阀两端应采用氧化锌避雷器或其他保护装置实现过电压保护;
- b) 应为单只晶闸管设置强制触发系统 (如 BOD 保护), 在过电压保护失效或晶闸管阀中仅部分晶闸管导通或关断的情况下起后备保护作用;
- c) 应设置动态均压回路与静态均压回路;
- d) 可在晶闸管阀支路上出现电流变化率越限时产生保护性触发。

##### 9.2.3 通流能力设计

###### 9.2.3.1 一般原则

应综合考虑容性提升模式和旁路模式下对晶闸管阀通流能力的要求。在设计中, 应保证工程要求的不同负荷水平与故障类型下, 晶闸管阀的结温处于允许的范围之内。

9.2.3.2 区内故障对通流能力的要求

应确保晶闸管阀能承受规定故障类型下的线路电流。特别地，如果在发生线路故障的过程中导通，则晶闸管阀应能承受线路故障电流和电容器放电电流的联合考验。在晶闸管阀与旁路开关分别接有电抗器的情况下，应保证对电容器放电电流有足够的阻尼。晶闸管阀的设备规范取决于具体设计方案：

- a) 线路故障时用晶闸管阀旁路电容器。设计时应确保晶闸管阀在故障发生后可靠地进入并维持在旁通模式（即故障期间晶闸管阀持续导通），并能在旁路开关合闸前承受故障电流的冲击。处于导通状态时的晶闸管阀能承受的最大涌流是由其能承受的最高结温所决定的，应确保系统故障发生在最严重过载的情况下晶闸管的结温仍然不超过允许值。
- b) 线路故障时用并联旁路间隙旁路故障电流。应确保晶闸管阀能承受持续半个工频周期的故障电流。为了触发旁路间隙，晶闸管阀应能承受相应电压电流作用，以使得电容电压上升至可靠触发旁路间隙的水平。通过晶闸管阀的涌流应限定在特定水平之下，以确保可在晶闸管两端施加反向阻断电压。

9.2.3.3 区外故障对通流能力的要求

区外故障会导致线路电流超出可控串补正常运行范围，可在故障期间通过晶闸管阀旁路串联电容器组。当线路电流下降到可控串补正常运行范围后应尽快将其重投。有特殊要求时，可控串补可在过电流情况（短时过载或暂态过载）下重投。在晶闸管阀的设计中，应确保晶闸管阀能承受故障持续期间的旁路电流，且在电力系统故障切除后晶闸管结温不超过允许值以实现可控串补的快速重投。

9.2.4 耐压能力设计

9.2.4.1 一般原则

可控串补典型的运行曲线如图 2 所示，由图 2 可得到晶闸管阀在可控串补处于额定（连续）运行、短时过载以及暂态过载状态时所承受的电流、电压水平。晶闸管阀在闭锁状态下承受的电压是晶闸管阀耐压能力设计中重要的参考依据，由于金属氧化物限压器的保护作用，晶闸管阀在闭锁状态下两端电压不超过保护水平  $U_{PL}$ 。 $U_{PL}$  通常为电容器在连续运行状态下电压峰值的 2.0~2.5 倍，在对电容器短时过载或暂态过载能力的要求较高时， $U_{PL}$  会相应提高。

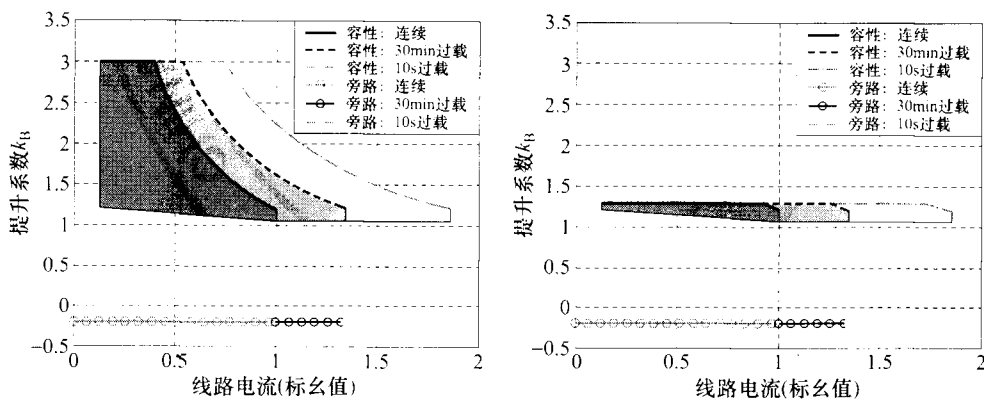


图 2 POD（左）和 SSR（右）时的 TCSC 运行范围示例

晶闸管阀在关断时所承受的电压过冲也是设计晶闸管阀耐压水平的重要考虑因素。可控串补运行在容性提升模式下晶闸管阀的典型电压波形图如图 3 所示，晶闸管阀所承受的电压过冲主要取决于其关断时刻的电流变化率和阀控电抗器的电感值。

如图 2 所示，可控串补处于连续运行、短时过载和暂态过载区域时，分别对应串联电容器不同的耐压水平。对于给定的串联电容器耐压水平，晶闸管的关断电压最大值出现在提升系数最大的运行点上。在晶闸管阀设计中，应确定晶闸管阀的最大关断电压，其值应大于可控串补在其运行范围内任意运行点的稳态关断电压。在控制器的设计中，应避免产生导致关断电压超过最大关断电压的控制命令。

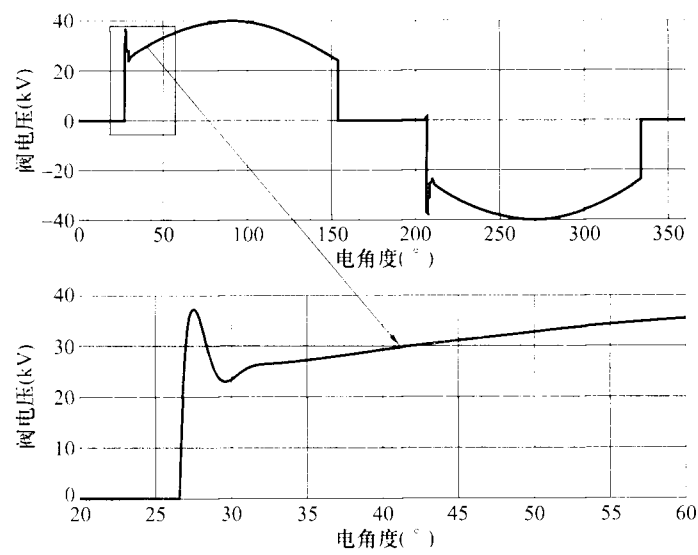


图 3 可控串补运行在容性提升模式下的晶闸管阀电压波形图

9.2.4.2 正常运行时晶闸管阀电压

按上述原则确定晶闸管阀关断电压的最大值是晶闸管阀耐压能力设计的基础。选择晶闸管的级数与电压额定值时，应考虑下列因素：

- a) 计及关断电压过冲在内的晶闸管阀承受的最高电压水平；
- b) 串联晶闸管级间的均压；
- c) 晶闸管级冗余配置。

9.2.4.3 故障时晶闸管阀电压

由于间隙导通时需要较大的网路电压，因此可控串补采用旁路间隙进行过电压保护时，应考虑晶闸管阀通过涌流之后的电压耐受能力。

当保护系统只采用连续旁路方案时，可不考虑上述特殊要求。

9.2.5 试验

9.2.5.1 一般规定

按规定，绝缘试验应采用组装完整的阀，某些运行试验既可采用组装完整的阀，也可采用规定的适当数量晶闸管级组成的阀组件，以验证阀设计满足规定的要求。

除非另有规定，所有型式试验应采用相同阀或阀组件。

在进行型式试验之前，应保证阀、阀组件及其组成部分通过例行试验，以确保制造的正确性。规定的型式试验可以按任意顺序进行。

9.2.5.2 例行试验

至少要进行下列规定的例行试验项目。

- a) 外观检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.1 进行）；
- b) 连接检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.2 进行）；
- c) 均压/阻尼回路检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.3 进行）；
- d) 耐受电压检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.4 进行）；
- e) 辅助设备检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.5 进行）；
- f) 触发检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.6 进行）；
- g) 冷却系统压力检查（按照 GB/T 20995—2007 中 8.7 进行）。

注：根据工程需求，可把型式试验中的相关项目作为例行试验。

9.2.5.3 型式试验

- a) 阀对地的工频耐压试验；

- b) 阀对地的雷电冲击试验;
- c) 阀端间操作冲击试验;
- d) 阀端间工频耐压试验;
- e) 容性提升模式下最大短时过载运行试验;
- f) 容性提升模式下最大暂态过载运行试验;
- g) 容性提升模式下最小交流电压试验;
- h) 旁路试验;
- i) 故障电流试验。

### 9.3 晶闸管阀的冷却系统

冷却系统分为水冷却系统和空气冷却系统, 本标准仅对水冷却系统提出基本设计要求。

冷却系统应包括所有必要的连接管件、管道网络、循环泵、补充池、热交换机、过滤器、仪表、自动控制设备、告警设备、电源控制系统和其他必要的设备。

晶闸管阀冷却系统设计中的基本要求如下(可参考 DL/T 1010.5 的相关条款):

- a) 为保证晶闸管阀与地电位间的绝缘以及冷却水的高电阻率, 应在密闭系统中使用去离子水和去离子回路。
- b) 可采取水—风或水—水的热交换方式。
- c) 应采用两台循环泵冗余配置, 一台运行, 一台处于热备用状态。当运行泵发生故障时, 备用泵应自动投运而无需关闭冷却系统, 同时显示报警信息。
- d) 每台循环泵应均能独立提供所需的最大水流量。
- e) 在采用水—风热交换方式时, 每个水—风热交换器应至少配有一台备用风机。
- f) 冷却系统应设有表计和指示器显示水冷系统主要部件的状态。
- g) 冷却系统应具备监测自身运行状态的功能, 并在必要的情况下启动保护动作及报警信号。
- h) 冷却系统应具备信号上传与远程控制功能。
- i) 如果水冷系统所在环境温度较低, 应添加乙二醇以防止冷却水凝固。
- j) 更换过滤器和去离子材料所需时间应该尽可能短, 且不应导致冷却系统停运。

### 9.4 阀控电抗器

#### 9.4.1 基本设计要求

- a) 阀控电抗器的设计、制造和试验应符合 GB/T 1094.6—2011 中第 9 章的要求;
- b) 阀控电抗器的额定电流应计及工频分量与谐波分量;
- c) 系统故障时, 阀控电抗器应能承受故障电流和电容器放电电流的电动力及热作用, 并有足够的热稳定及动稳定耐受能力;
- d) 阀控电抗器端子间的额定绝缘水平应根据可控串补保护水平确定, 并满足 GB 311.1 的规定;
- e) 阀控电抗器宜采用单相干式空心电抗器;
- f) 阀控电抗器的品质因数  $Q$  值不宜小于 80;
- g) 在确定电抗器的容量时应综合考虑 TCSC 的运行特性曲线、谐波电流和过载能力等因素;
- h) 在设计中应采取措施减小感抗偏差, 每相总电抗值偏差应小于 3%, 三相之间偏差应小于 2%;
- i) 应结合电抗器的容量与型式对其损耗进行评估;
- j) 装设在严寒、高海拔等地区 and 污秽、易燃、易爆等环境中的电抗器, 应满足相应的特殊要求;
- k) 对噪声水平如有特殊要求, 应明确最大允许噪声水平;
- l) 在进行设备布置时, 应考虑阀控电抗器中通过电流时的热效应以及通过短路电流时的电动力效应可能会对附近金属构件的影响, 并采取应对措施。

#### 9.4.2 试验

##### 9.4.2.1 例行试验

- a) 绕组电阻的测量(按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.2 和 GB 1094.1 进行);

- b) 电抗测量（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.5 进行）；
- c) 损耗和品质因数测量（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.6 进行）；
- d) 绕组过电压试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.7 进行）。

#### 9.4.2.2 型式试验

- a) 电抗测量（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.5 进行）；
- b) 损耗和品质因数测量（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.6 进行）；
- c) 温升试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.8 进行）；
- d) 雷电冲击试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.9 进行）。

#### 9.4.2.3 选项试验

仅应需方要求进行下述部分或全部的选项试验项目。

- a) 短路电流试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.10 进行）；
- b) 声级测量（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.11 进行）；
- c) 独立交流电源耐压试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.12 进行）；
- d) 放电电流试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.14 进行）；
- e) 振动试验（按照 GB/T 1094.6—2011 中 9.10.16 进行）；
- f) 绕组电阻—频率特性测量。

注 1：如果完成了短路电流试验，只有当放电电流幅值大于短路电流幅值，才应进行放电电流试验。

注 2：可在较低的电压下采用电桥测量方法进行绕组电阻—频率特性测量，以给定的谐波频率范围作为该项测量的规定频谱。

### 9.5 金属氧化物限压器

#### 9.5.1 基本设计要求

- a) MOV 热备用的容量裕度不应少于 10%（每相至少一柱），并应具备良好的防爆性能；
- b) MOV 的技术要求、特性参数与试验方法应遵循 GB 11032—2010 和 GB/T 6115.2—2012 的相关规定；
- c) MOV 的阀片应具备一致性，整组 MOV 应在相同的工艺和技术条件下生产加工而成，并经过严格的配片计算以降低不平衡电流，同一相每柱之间的不平衡系数应小于 5%；
- d) MOV 应能承受串补装置正常及过载运行条件下的电压，其过电压水平要考虑串联电容器组在电力系统各种故障条件下出现的最高峰值电压；
- e) MOV 的能耗计算应考虑系统发生区内和区外故障（包括单相接地故障、两相短路故障、两相接地故障和三相接地故障）以及故障后线路摇摆电流流过串补装置过程中 MOV 积累的能量，还应计及线路保护的动作时间与重合闸时间对 MOV 能量积累的影响；
- f) 在发生区内故障时，串补装置的控制保护系统可根据 MOV 的电流、能量、能量上升速度以及温度等信号启动间隙与旁路开关动作以旁路故障电流，可控串补的控制保护系统除采取上述措施外还可启动晶闸管阀旁路串联电容器组。在确定 MOV 的额定值与相关技术参数时，应计及上述控制措施的影响。

#### 9.5.2 试验

##### 9.5.2.1 例行试验

- a) 持续电流试验（按照 GB 11032—2010 中 8.14 进行）；
- b) 工频参考电压试验（按照 GB 11032—2010 中 8.15 进行）；
- c) 直流参考电压试验（按照 GB 11032—2010 中 8.16 进行）；
- d) 0.75 倍直流参考电压下漏电流试验（按照 GB 11032—2010 中 8.17 进行）；
- e) 密封性能试验（按照 GB 11032—2010 中 8.11 进行）；
- f) 局部放电试验（按照 GB 11032—2010 中 8.8 进行）；

g) 多柱电流分布试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.18 进行)。

9.5.2.2 型式试验

- a) 外套的绝缘耐受试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.2 进行);
- b) 残压试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.3 进行);
- c) 长持续时间电流冲击耐受试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.4 进行);
- d) 大电流冲击耐受试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.19 进行);
- e) 动作负载试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.5 进行);
- f) 弯曲负荷试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.9 进行);
- g) 密封泄漏试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.11 进行);
- h) 持续电流试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.14 进行);
- i) 工频参考电压试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.15 进行);
- j) 直流参考电压试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.16 进行);
- k) 0.75 倍直流参考电压下漏电流试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.17 进行);
- l) 内部局部放电试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.8 进行);
- m) 无线电干扰电压 (RIV) 试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.12 进行);
- n) 多柱电流分布试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.18 进行);
- o) 压力释放试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.7 进行)。

9.6 间隙

9.6.1 基本设计要求

- a) 间隙的自触发电压不应低于保护水平的 1.05 倍。
- b) 间隙宜设计为强制触发型, 间隙的触发动作不应受温度、湿度、大气压力、电磁干扰等外界环境因素的影响, 在拉合串联隔离开关时不应出现误触发。间隙的强迫触发电压不应高于保护水平的 0.8 倍。
- c) 区内故障时, 间隙应能可靠动作, 启动间隙保护动作时间、信号传输时间、触发回路触发间隙击穿时间的总和约为 1.0ms, 旁路开关合闸后, 间隙的去游离时间不应大于 400ms。
- d) 应通过合理设计使得间隙的距离可调。
- e) 间隙触发的导通时间、不触发条件下的最小工频放电电压、间隙介质强度的恢复时间以及恢复电压等性能指标应通过试验确定。
- f) 控制保护系统应有间隙触发回路的监测功能, 当间隙触发回路故障或中断后, 及时产生相应的告警信号。
- g) 间隙在额定工况下动作 25 次应免维护。

注: 本标准仅涉及强制触发型的连续电弧火花间隙。

9.6.2 试验

9.6.2.1 例行试验

对主间隙应做尺寸检查, 并对主间隙的组件, 如电极、均压部件、套管和支撑绝缘子等应进行例行试验和检查 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.1.1.3.1.2 进行)。

9.6.2.2 型式试验

- a) 主间隙的故障电流试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.1.1.3.1.1 进行);
- b) 主间隙的放电电流试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.1.1.3.1.1 进行);
- c) 主间隙的恢复电压试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.1.1.3.1.1 进行);
- d) 间隙整体试验 (包括工频自放电电压试验、工频电压耐受试验、触发放电电压试验);
- e) 主间隙附件的工频电压耐受试验;
- f) 主间隙自放电电压试验;



g) 间隙的电晕试验。

## 9.7 阻尼装置

### 9.7.1 技术要求

- a) 阻尼装置应能承受规定的线路电流与过载电流，在串联电容器组被旁路后，还应能承受电容器的放电电流与最大故障电流之和的热与机械效应；
- b) 电容器的放电电流（峰值）应小于电容器额定电流的 100 倍；
- c) 放电电流的幅值和放电频率的乘积不宜超过  $100\text{kA} \cdot \text{kHz}$ ；
- d) 旁路开关的关合电流应小于其允许值；
- e) 间隙的关合电流应小于其允许值；
- f) 间隙或旁路开关动作后，MOV 能耗应能很快停止上升；
- g) 阻尼装置的长期运行电流与电容器额定电流相当；
- h) 串联电容器组旁路后，阻尼装置应具有足够的热容量确保自身的安全运行；
- i) 在短路与串联电容器组放电过程中具有良好的机械和热稳定性。

### 9.7.2 试验

#### 9.7.2.1 例行试验

- a) 限流阻尼电抗器的电抗测量（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.2 进行）；
- b) 限流阻尼电抗器的电阻测量（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.2 进行）；
- c) 限流阻尼电抗器的损耗测量（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.2 进行）；
- d) 限流阻尼电抗器的冲击电压试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.2 进行）；
- e) 限流阻尼电阻器的电阻测量（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.2 进行）；
- f) 限流阻尼电阻器的泄漏试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.2 进行）；
- g) 限流阻尼电阻器的击穿电压试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.2 进行）。

#### 9.7.2.2 型式试验

- a) 限流阻尼电抗器的故障电流试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.1 进行）；
- b) 限流阻尼电抗器的放电试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.1 进行）；
- c) 限流阻尼电抗器的温升试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.1.1 进行）；
- d) 限流阻尼电抗器的冲击耐压试验（按照 GB/T 1094.4 进行）；
- e) 限流阻尼电抗器的短时电流耐受试验（按照 GB 1094.5 进行）；
- f) 限流阻尼电抗器的声级测量（按照 GB/T 1094.10 进行）；
- g) 限流阻尼电阻器的能量吸取能力试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.1 进行）；
- h) 限流阻尼电阻器的高频电流耐受试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.1 进行）；
- i) 限流阻尼电阻器的工频故障电流耐受试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.1 进行）；
- j) 限流阻尼电阻器的包封附件的冲击电压试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.4.3.2.1 进行）；
- k) 限流阻尼电阻器的工频参考电压试验（按照 GB 11032—2010 中 8.15 进行）；
- l) 限流阻尼电阻器的直流参考电压测量（按照 GB 11032—2010 中 8.16 进行）；
- m) 限流阻尼电阻器的 0.75 倍直流参考电压下漏电流试验（按照 GB 11032—2010 中 8.17 进行）；
- n) 限流阻尼电阻器的局部放电试验（按照 GB 11032—2010 中 8.8 进行）；
- o) 限流阻尼电阻器的多柱电流分布试验（按照 GB 11032—2010 中 8.18 进行）；
- p) 限流阻尼电阻器的外套的绝缘耐受试验（按照 GB 11032—2010 中 8.2 进行）；
- q) 限流阻尼电阻器的密封泄漏试验（按照 GB 11032—2010 中 8.11 进行）；
- r) 限流阻尼电阻器的持续电流试验（按照 GB 11032—2010 中 8.14 进行）；
- s) 限流阻尼电阻器的压力释放试验（按照 GB 11032—2010 中 8.7 进行）；

- t) 限流阻尼电阻器的弯曲负荷试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.9 进行);
- u) 限流阻尼电阻器的长持续时间电流冲击耐受试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.4 进行);
- v) 限流阻尼电阻器的大电流冲击耐受试验 (按照 GB 11032—2010 中 8.19 进行);
- w) 限流阻尼电阻器的热机和沸水煮试验 (按照 GB 11032—2010 进行)。

## 9.8 旁路开关

### 9.8.1 技术要求

用于串补装置的旁路开关,除应满足 GB 1984 所规定的一般性技术条件之外,还应符合下列要求:

- a) 能承受合闸涌流、工频短路电流与电容器高频放电电流的联合作用;
- b) 能承受切合电容器时产生的应力,且不会出现重击穿;
- c) 对于需要经常投切的断路器,应具备频繁操作的能力和较高的可靠性;
- d) 旁路开关应能在不低于按电容器和阻尼装置所确定的频率下实现上述功能;
- e) 用于串补装置的旁路开关应进行 GB/T 6115.2—2002 所规定的各项试验。

### 9.8.2 试验

#### 9.8.2.1 例行试验

- a) 主回路工频耐受电压试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.2 进行);
- b) 辅助和控制回路耐压试验 (按照 GB/T 11022—2011 中 7.3 进行);
- c) 主回路电阻测量 (按照 GB/T 11022—2011 中 7.4 进行);
- d) 机械操作试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.2 进行);
- e) 设计和外观检验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.2 进行);
- f) 密封试验。

#### 9.8.2.2 型式试验

- a) 绝缘试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.1 进行);
- b) 无线电干扰电压 (RIV) 试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3 进行);
- c) 温升试验 (按照 GB/T 11022—2011 中 6.5 进行);
- d) 回路电阻测量 (按照 GB/T 11022—2011 中 6.4 进行);
- e) 短时耐受电流和峰值耐受电流试验 (按照 GB/T 11022—2011 中 6.6 进行);
- f) 机械和环境试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.1 进行);
- g) 容性电流操作试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.2.3.1 进行);
- h) 密封试验;
- i) 旁路开关电流试验;
- j) 投入电流试验;
- k) 防护等级试验;
- l) 端子静负载试验。

注:无线电干扰试验应按制造厂和用户协商一致的意见进行。

## 9.9 隔离开关

### 9.9.1 技术要求

应设置隔离开关与接地开关,以便在不影响线路正常运行的条件下将串补装置与电力系统隔离。隔离开关的设计应参考 GB 1985—2004 的有关规定。应基于电压等级、最大稳态电流以及故障暂态电流选择隔离开关。用于串补装置的隔离开关应进行 GB/T 6115.2—2002 所规定的各项试验。

### 9.9.2 试验

#### 9.9.2.1 例行试验

- a) 主回路工频耐受电压干试验 (按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.3.3.2 进行);

- b) 辅助和控制回路耐压试验（按照 GB/T 11022—2011 中 7.3 进行）；
- c) 主回路电阻测量（按照 GB/T 11022—2011 中 7.4 进行）；
- d) 机械操作试验（按照 GB 1985—2004 中 7.5 进行）。

#### 9.9.2.2 型式试验

- a) 绝缘试验（按照 GB/T 11022—2011 中 6.2 进行）；
- b) 无线电干扰电压（RIV）试验（按照 GB/T 11022—2011 中 6.3 进行）；
- c) 温升试验（按照 GB/T 11022—2011 中 6.5 进行）；
- d) 回路电阻测量（按照 GB/T 11022—2011 中 6.4 进行）；
- e) 短时耐受电流和峰值耐受电流试验（按照 GB/T 11022—2011 中 6.6 进行）；
- f) 操作和机械寿命试验（按照 GB/T 6115.2—2002 中 2.3.3.1 进行）；
- g) 严重覆冰条件下的操作（按照 GB 1985—2004 中 6.15 进行）；
- h) 在温度限值时操作（按照 GB 1985—2004 中 6.16 进行）；
- i) 机械特性试验；
- j) 端子静态机械负荷试验；
- k) 开合感性小电流试验；
- l) 开合容性小电流试验。

注：无线电干扰试验应按制造厂与用户协商一致的意见进行。严重覆冰条件下的操作仅在用户有特殊要求时进行。

### 9.10 电压互感器

#### 9.10.1 绝缘水平

安装于地面的电压互感器，绝缘水平与系统电压对应的绝缘水平应一致；安装于串补平台上的电压互感器，绝缘水平应遵循 GB/T 6115.1—2008 的相关规定。

#### 9.10.2 试验

电磁式电压互感器的例行试验、型式试验方法应遵循 GB 1207 的规定；电容式电压互感器的例行试验、型式试验的试验内容与试验方法应遵循 GB/T 4703 的规定。

### 9.11 电流互感器

#### 9.11.1 测量与供能

在串补装置中，电流互感器的主要作用是对以下电流量进行测量：

- a) 线路电流；
- b) 电容器组电流；
- c) 电容器组不平衡电流（如果有）；
- d) MOV 电流；
- e) 间隙电流；
- f) 平台电流；
- g) 晶闸管阀电流（如果有）；
- h) 旁路开关电流（如果有）。

电流互感器也可用于对装设在串补平台上的保护和控制设备提供辅助供电电源。在系统设计中，应确保电流互感器能承受故障电流热应力的考验与串联电容器放电时产生的冲击电流机械应力的考验。

#### 9.11.2 绝缘水平

- a) 装于地电位的电流互感器，其绝缘水平应与电力系统电压对应的绝缘水平相一致；
- b) 装于平台电位的电流互感器，其绝缘水平应符合 GB/T 6115.1—2008 的相关规定。

#### 9.11.3 精度

- a) 测量用电流互感器的精度不宜低于 0.2 级；

- b) 保护用电流互感器的精度不宜低于 5P;
- c) 对电容器组采用 H 桥接线的不平衡电流互感器, 应满足本条 a) 和 b), 且测量精度应与保护灵敏度相配合;
- d) 对电容器组采用分支接线的电流互感器, 应满足本条 a) 和 b), 还应考虑一致性;
- e) 同时用于测量和保护, 应满足本条 a) 和 b);
- f) 取能用电流互感器的精度不宜低于 5P。

#### 9.11.4 试验

##### 9.11.4.1 例行试验

- a) 端子标志检验 (按照 GB 1208—2006 中 9.1 进行);
- b) 一次绕组的工频耐压试验;
- c) 局部放电测量 (按照 GB 1208—2006 中 9.2 进行);
- d) 一次绕组和二次绕组的段间及二次绕组的工频耐压试验 (按照 GB 1208—2006 中 9.3 进行);
- e) 匝间过电压试验 (按照 GB 1208—2006 中 9.4 进行);
- f) 电容量和介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 测量 (按照 GB 1208—2006 中 9.5 进行);
- g) 绝缘油性能试验 (按照 GB 1208—2006 中 9.6 进行);
- h) 密封性能试验 (按照 GB 1208—2006 中 9.7 进行);
- i) 误差测定。

##### 9.11.4.2 型式试验

- a) 短时电流试验 (按照 GB 1208—2006 中 8.1 进行);
- b) 温升试验 (按照 GB 1208—2006 中 8.2 进行);
- c) 一次绕组冲击试验 (按照 GB 1208—2006 中 8.3 进行);
- d) 户外式互感器湿试验 (按照 GB 1208—2006 中 8.4 进行);
- e) 无线电干扰电压 (RIV) 测量 (按照 GB 1208—2006 中 8.5 进行);
- f) 绝缘热稳定试验 (按照 GB 1208—2006 中 8.6 进行);
- g) 误差测定;
- h) 局部放电试验 (按照 GB 1208—2006 中 6.1.2.2 进行) (适用时);
- i) 电容量和介质损耗因数 ( $\tan\delta$ ) 测量 (按照 GB 1208—2006 中 9.5 进行) (适用时);
- j) 绝缘油性能试验 (按照 GB 1208—2006 中 9.6 进行) (适用时)。

##### 9.11.4.3 选项试验

- a) 一次绕组的截断冲击试验 (按照 GB 1208—2006 中 10.1 进行);
- b) 机械强度试验 (按照 GB 1208—2006 中 10.2 进行);
- c) 传递过电压测量 (按照 GB 1208—2006 中 10.3 进行)。

#### 9.12 光纤柱

##### 9.12.1 外绝缘

光纤柱宜采用复合型外绝缘。

##### 9.12.2 试验

###### 9.12.2.1 例行试验

在装配好的光纤柱上进行工频耐受电压试验、额定机械负荷试验、光衰耗测量。试验内容应遵循 GB/T 6115.2—2002 的相关规定。

###### 9.12.2.2 型式试验

光纤柱的型式试验应遵循 GB/T 6115.2—2002 的相关规定。试验项目如下:

- a) 雷电冲击耐受电压试验;

- b) 操作冲击耐受电压干试验;
- c) 操作冲击耐受电压湿试验;
- d) 工频耐受电压湿试验;
- e) 无线电干扰电压 (RIV) 试验;
- f) 衰耗测量;
- g) 温度循环试验;
- h) 密封性能试验;
- i) 额定机械负荷耐受试验。

### 9.13 串补平台及其支撑系统

#### 9.13.1 基本要求

- a) 用于支撑串补平台的支柱绝缘子应按电压等级、爬电距离、机械载荷等技术条件进行选择与设计, 应确保足够的爬距和间隔以便设备的运行与维护;
- b) 应在综合考虑串补装置安装地点的风速、覆冰、积雪、地震烈度等气象、地理、地质条件的基础上, 进行串补平台的力学分析与设计, 确保其机械强度和支撑性能满足运行要求;
- c) 串补装置的母线及其金具应能承受电容器的全部放电电流和最大故障电流;
- d) 平台上外边缘及必要处应设护栏, 在护栏、扶手、维护通道和电气设备之间要有足够的电气安全距离;
- e) 平台下均压环、光端子箱应满足电气对地距离要求;
- f) 串补平台的自振荡频率设计应合理, 应能避免与串补平台上的设备发生谐振;
- g) 设计时应充分考虑各种实际工况的载荷, 包括自重载荷、风载荷、雪载荷、覆冰载荷、活载荷和地震载荷等;
- h) 每个串补平台配一个梯子, 以便安装、维护, 梯子与平台应设计有电气闭锁功能。

#### 9.13.2 绝缘水平

绝缘水平是一组试验电压值 (工频和冲击), 它表征串补平台对地、相间、全部设备的端子间及装于串补平台的设备与串补平台之间的绝缘特性。串补平台的绝缘水平与装置所处系统的电压等级和装置安装的海拔有关。

### 9.14 控制保护系统

#### 9.14.1 基本要求

- a) 在串补装置所在变电站内应能实现对旁路开关、旁路隔离开关、串联隔离开关、接地开关以及晶闸管阀 (如果有) 等所有关键设备状态的监视与控制;
- b) 应能通过远动设备实现对串补装置关键设备状态的监视;
- c) 宜采用双系统冗余配置方案来设计控制保护系统;
- d) 控制、保护、监视、信号等主要设备应在串补装置控制小室内组屏;
- e) 人机界面宜采用高级语言编程, 用图形显示模拟接线图、各功能模块以及采集电气量的数值等。

#### 9.14.2 结构和外观

控制保护系统的结构和外观应满足下列要求:

- a) 机箱、插件的尺寸应符合 GB/T 19520.12 的规定;
- b) 外壳防护应符合 GB 4208 中规定的外壳防护等级不应低于 IP20 的要求, 其中, 室外部分应符合 GB 4208 中规定的外壳防护等级不应低于 IP54 的要求;
- c) 控制保护设备内两带电导体之间以及带电导体与裸露不带电导体之间的最小距离, 均应符合 GB/T 14598.3—2006 中第 5 章的规定;

- d) 着火危险的防护应符合 GB 14598.27—2008 中第 7 章的规定;
- e) 控制保护设备应有安全标志, 与安全相关的标志应符合 GB 14598.27—2008 中 9.1 的规定。

#### 9.14.3 电磁兼容性能

控制保护系统应能在 GB/T 14285—2006 中 6.5.1 所规定的电磁环境中正常工作。可参考 GB/T 14285—2006 中 6.5.3 提出的防护措施来提高控制保护系统的电磁兼容性能。同时, 还应遵循下列设计原则:

- a) 控制保护系统的非带电金属部分应在电气上连为一体, 并具有可靠的接地点。
- b) 宜尽可能地缩短平台测量回路的电缆长度, 电缆宜穿装在金属屏蔽管内, 金属屏蔽管与串补平台应可靠连接。电缆两端应为同一电位, 以避免存在电位差。
- c) 电流互感器宜安装在串补平台的低压侧。如使用分压器测量电容电压, 宜将测量电压在分压器二次端子盒内直接转换为光信号。

#### 9.14.4 电源

串补装置的控制保护系统所需电源宜采用 380V/220V、50Hz 交流电源, 220V/110V 直流电源和 UPS 电源, 应满足以下要求:

- a) 应有两路独立的交流电源, 电压允许偏差为 $-20\% \sim +15\%$ , 频率允许偏差为 $\pm 5\%$ , 畸变因数不大于 5%;
- b) 两路交流电源不能相互切换, 正常时两路全部供电;
- c) 两路直流电源应完全独立, 电压允许偏差为 $-20\% \sim +15\%$ , 纹波系数不大于 5%。

串补平台上控制保护及测量设备所需电源可通过光纤从串补装置的控制保护系统地面部分提供, 也可通过取能 TA 或 TV 提供。

线路故障时串补平台上测量装置的供电不应受影响。

#### 9.14.5 功能设计

##### 9.14.5.1 控制功能

控制系统应具有远方和就地控制功能, 各设备控制操作应有电气防误闭锁功能, 以防止误操作与多点控制; 通常采用分层控制和各种控制策略实现预定的控制功能。控制策略及其定值设置应与装设串补装置的目的密切相关, 同时应根据电网结构的不同而做出相应的调整。对可控串补, 其每一项预期的控制功能应通过系统分析、仿真和试验等手段进行有效性的验证。可控串补典型的控制功能主要有阻抗控制、潮流控制、暂态稳定性控制、抑制 SSR 控制、阻尼低频功率振荡和电压控制等。

控制保护系统应具有完备的监测功能, 同时也应对测量系统进行监测, 并产生相应的告警和保护动作信号。控制保护系统至少应配备同步时钟和故障暂态录波系统。

串补装置投入或退出的操作应具有手动和自动两种方式, 当采用自动方式时, 串补装置可按照预定的自动流程投入或退出, 实现串补装置的接地、隔离、旁路、运行等状态的自动转换。

控制保护系统应具有保护投退软压板功能和保护出口硬压板功能。

##### 9.14.5.2 保护功能

固定串补控制保护系统应实现以下全部或部分的保护功能:

- a) MOV 过电流保护;
- b) MOV 能量保护;
- c) MOV 温度保护;
- d) MOV 不平衡保护 (需要时);
- e) MOV 能量梯度保护 (需要时);
- f) 间隙自触发保护;
- g) 间隙拒触发保护;
- h) 间隙延迟触发保护 (需要时);

- i) 电容器不平衡保护;
- j) 电容器过负荷保护;
- k) 串补平台闪络保护;
- l) 旁路开关三相不一致保护;
- m) 旁路开关合闸失灵保护;
- n) 旁路开关分闸失灵保护;
- o) 刀闸三相不一致告警。

注:如不是采用强制触发型的连续电弧火花间隙,则应根据间隙的差异对间隙保护做出相应调整。

可控串补控制保护系统还应实现以下全部或部分的保护功能:

- a) 阀过载保护;
- b) 阀拒触发保护;
- c) 阀不对称触发保护(需要时);
- d) 阀裕度不足保护(需要时);
- e) 冷却系统保护。

注:阀过载保护实现了可控串补由于阀过载而导致的等效阻抗或提升系数的限制功能。

固定串补控制保护系统的动作出口主要有:

- a) 产生保护、告警事件及顺序事件记录;
- b) 启动录波;
- c) 合旁路开关,暂时闭锁;
- d) 合旁路开关,永久闭锁;
- e) 分旁路开关(串补装置重投);
- f) 触发间隙;
- g) 跳线路两侧断路器。

注:合旁路开关,暂时闭锁也称为合旁路开关,暂时旁路。

可控串补控制保护系统的动作出口还包括:

- a) 晶闸管阀旁路串联电容器组;
- b) 暂时闭锁晶闸管阀;
- c) 永久闭锁晶闸管阀。

#### 9.14.5.3 监视与录波功能

控制保护系统应能实现对旁路开关、隔离开关、接地开关等设备状态的监视与显示,并将上述设备相应的状态信号、操作信号以及报警信号等信息通过网络发送至主控制室。控制保护系统还应具备自动监视、记录串补装置发生的事件与故障信息的功能,相关数据应存储在可重复利用的数据介质上(参见附录 E)。

#### 9.14.6 试验

##### 9.14.6.1 一般规定

功能试验应包括仿真试验,用以证明控制保护系统在各种运行模式下的功能正确。把控制保护系统接入实时数字仿真器,可在不同的电力系统条件下进行各种仿真试验。控制保护系统性能的仿真试验应证明串补装置在规定的运行模式下能正常运行。

除非另有说明,对环境条件应按 GB/T 2423.2、GB/T 2423.3,对机械性能测试应按 GB/T 11287、GB/T 14537,对绝缘试验应按 GB/T 14598.3—2006,对辅助电源电压波动应按 GB/T 17626.11—2008 中 8.2 和 GB/T 17626.29—2006 中 8.2,对电磁兼容要求应按 GB/T 14598.9、GB/T 14598.10、GB/T 14598.13、GB/T 14598.14 的规定执行。

### 9.14.6.2 例行试验

- a) 外观检查。
- b) 绝缘性能试验（按照 GB/T 14598.3—2006 中 6.1 进行）。
- c) 100h 老化试验。
- d) 运行试验：
  - 1) 控制保护系统的运行试验程序包括向每个输入注入信号，该信号模拟规定的保护动作条件，然后检测相应的输出。需要核实控制保护系统的所有硬件和软件设置。软件设置可通过相应的软件手段来核实。
  - 2) 平台与地之间的通信采用光纤方式，应检查激光发送器的输出功率。
  - 3) 平台对地光纤柱的每根光纤都应进行光纤衰减测试。

控制保护系统的平台部分、平台和地通信部分及地面部分都应进行上述试验。试验的目的是验证控制保护系统的各个组成部分及整体满足制造质量要求。

### 9.14.6.3 型式试验

- a) 环境试验：干热试验和湿热试验（按照 GB/T 2423.2 和 GB/T 2423.3 进行）。
- b) 绝缘试验（按照 GB/T 14598.3—2006 中 6.1 进行）。
- c) 辅助电源电压波动（按照 GB/T 17626.11—2008 中 8.2 和 GB/T 17626.29—2006 中 8.2 的规定和方法进行）。
- d) 电磁兼容试验：
  - 1) 辐射电磁场干扰试验。按 GB/T 14598.9 的规定和方法，对控制保护设备进行辐射电磁场干扰试验。
  - 2) 快速瞬变干扰试验。按 GB/T 14598.10 的规定和方法，对控制保护设备进行快速瞬变干扰试验。
  - 3) 脉冲群干扰试验。按 GB/T 14598.13 的规定和方法，对控制保护设备进行脉冲群干扰试验。
  - 4) 静电放电干扰试验。按 GB/T 14598.14 的规定和方法，对控制保护设备进行静电放电干扰试验。
- e) 机械试验：
  - 1) 振动试验。按 GB/T 11287 的规定和方法，对控制保护设备进行振动响应试验和振动耐久试验。
  - 2) 冲击试验。按 GB/T 14537 的规定和方法，对控制保护设备进行冲击响应试验和冲击耐久试验。
  - 3) 碰撞试验。按 GB/T 14537 的规定和方法，对控制保护设备进行碰撞试验。

控制保护系统的平台部分、平台和地通信部分及地面部分都应进行上述试验。

注：通常规定的继电保护、控制设备和平台对地通信设备的现场投运前试验都应在串补装置加电接入高压电网前进行。

### 9.14.6.4 选项试验

宜采用实时数字仿真来验证控制保护系统的各种功能和操作的正确性。

控制保护系统接入到网络仿真器，即控制保护系统和仿真器之间连接上所有的有用信号。仿真所采用的网络是基于实际电力系统的数据，按电力系统的特性和要求来测试控制保护系统的控制和保护功能。如果有现场录波数据且适用，可以在仿真试验中载入并应用这些录波数据。图 4 给出了可控串补控制保护系统实时仿真的典型框图。

在仿真试验中，可载入现有网络的录波数据来替换部分电网。此时，可控串补控制器的运行不应影响被录波数据替换的那部分电网。

在最坏工况的仿真试验中，通过检测电压和电流值来验证可控串补高压设备布置的正确性。此时，



要求仿真试验中采用的可控串补高压设备的模型比较精确。

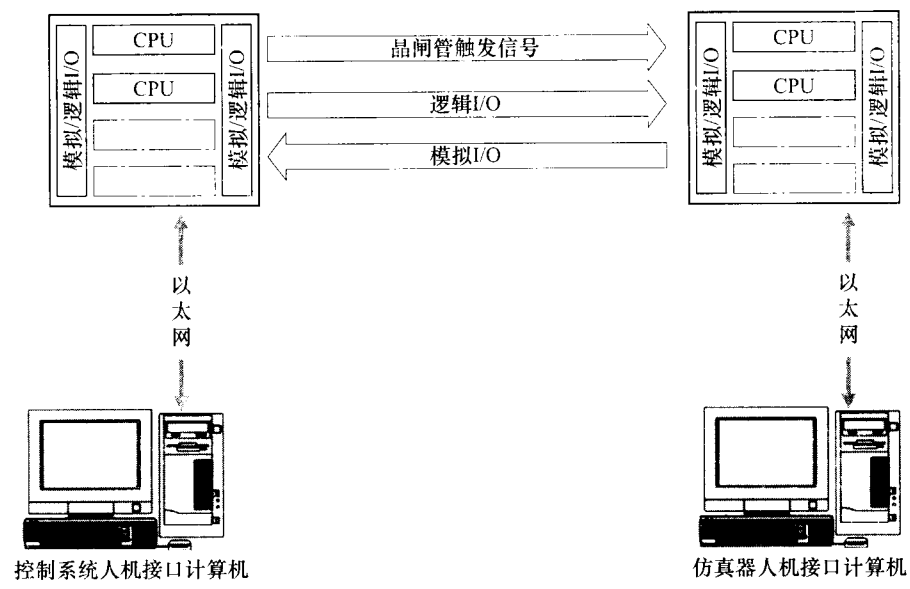


图 4 可控串补控制保护系统实时仿真的典型框图

附录 A  
(资料性附录)  
可控串补的特性

A.1 TCSC 的运行模式

TCSC 可以采用一个或多个可控模块串联来满足工程要求的性能需要。TCSC 有四个运行模式：

- a) 容性提升模式；
- b) 感性提升模式；
- c) 闭锁模式；
- d) 旁路模式。

实际工程中通常只采用容性提升模式、闭锁模式和旁路模式。

TCSC 运行特性由串联电容器和阀控电抗器的参数所决定。对于给定触发角  $\alpha$ ，可以用式 (A.1) 计算出 TCSC 的等效电抗  $X(\alpha)$ 。

$$X(\alpha) = \frac{1}{2\pi f_N C} \left[ 1 - \frac{\lambda^2}{\lambda^2 - 1} \times \frac{2\beta + \sin(2\beta)}{\pi} + \frac{4\lambda^2}{(\lambda^2 - 1)^2} \cos^2 \beta \frac{\lambda \tan(\lambda\beta) - \tan \beta}{\pi} \right] \tag{A.1}$$

式中：

- $\alpha$ ——以电容电压过零点为基准的触发角；
- $C$ ——串联电容器的电容值；
- $\lambda$ ——自振频率标幺值，可用式 (A.2) 计算出；
- $\beta$ ——导通角  $(\pi - \alpha)$  的一半。

$$\lambda = \frac{1}{2\pi f_N \sqrt{LC}} \tag{A.2}$$

式中：

$L$ ——阀控电抗器的电感值。

为了和其他的电力电子装置定义一致，TCSC 的触发角是按电压过零点为基准定义的，实际的工程中常采用线路电流过零点为基准进行触发角控制，TCSC 的稳态波形图如图 A.1 所示。

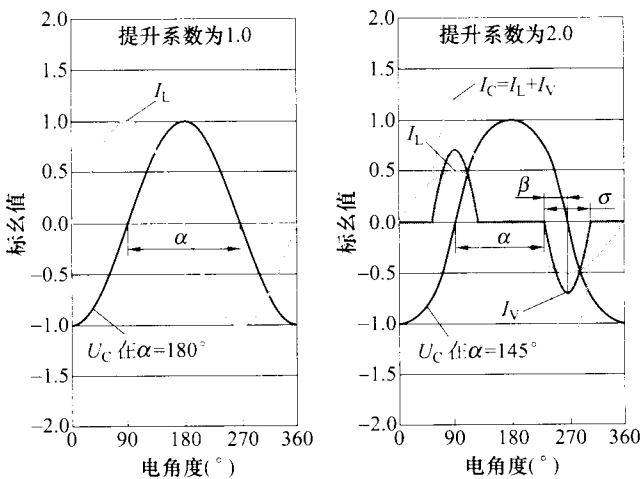


图 A.1 TCSC 稳态波形图

A.2 TCSC 的无功功率

当 TCSC 运行在容性提升模式时，TCSC 的无功功率和串联电容器组的无功功率是不同的。TCSC 的无功功率  $Q_{\text{TCSC}}$  和串联电容器的无功功率  $Q_{\text{CAP}}$  可由式 (A.3) 和式 (A.4) 得到。

$$Q_{\text{TCSC}} = 3k_{\text{B}} \frac{1}{\omega C} I_{\text{L}}^2 \tag{A.3}$$

$$Q_{\text{CAP}} = 3k_{\text{B}}^2 \frac{1}{\omega C} I_{\text{L}}^2 \tag{A.4}$$

式中：

$k_{\text{B}}$  ——可控串补的提升系数；

$I_{\text{L}}$  ——工频线路电流。

TCSC 额定容量应定义为在额定提升系数和额定线路电流时对应的  $Q_{\text{TCSC}}$  值。

A.3 TCSC 的主要参数

- a) 系统标称电压；
- b) 基本串补度；
- c) 额定频率；
- d) 额定提升系数；
- e) 最大提升系数；
- f) 过电压保护水平；
- g) MOV 额定电压；
- h) MOV 能量；
- i) TCSC 额定电流；
- j) TCSC 额定容量；
- k) TCSC 额定容抗；
- l) TCSC 额定电压；
- m) 阀控电抗器电抗值；
- n) 晶闸管最大冲击电流。

附录 B  
(规范性附录)  
串补装置的仿真模型

根据不同的研究目标和范围，串补装置系统分析可分为如下几种类型：稳态分析，主要研究稳态潮流控制，实现灵活输电并降低网损；机电暂态分析，主要研究串补装置提高电力系统暂态稳定和动态稳定性能；电磁暂态分析，主要进行过电压、过电流及暂态谐波计算，用于确定设备参数、绝缘和保护水平；电磁—机电暂态联合分析，主要用于次同步谐振研究。对于不同的计算应采用不同的分析模型。

B.1 稳态分析模型

FSC 在稳态计算中以参数固定的电容器来模拟。在稳态运行条件下，FSC 的工作电流通常不会大于保护电流水平，因此，FSC 过电压保护设备（如 MOV）的影响可忽略。

TCSC 的稳态模型与研究目的密切相关，根据控制目标的不同可有不同的数学模型。图 B.1 给出了 TCSC 潮流控制稳态模型，其目标是维持线路有功功率为给定值  $P_{des}$ ，其中， $P_L$  为线路的有功功率。在电力系统潮流计算中，通常采用串联的可变阻抗元件模拟 TCSC，通过调整装置的阻抗参数实现对线路潮流和母线电压的控制。

装设 TCSC 的电力系统稳态特性分析主要包括以下两个方面的内容：

- a) 研究 TCSC 对线路潮流、母线电压等电力系统稳态运行工况的影响；
- b) 根据预定的运行目标确定 TCSC 的运行方式及其补偿容量等设备参数。

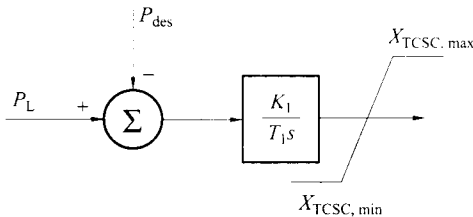


图 B.1 TCSC 潮流控制稳态模型（线路潮流控制模型）

B.2 机电暂态分析模型

FSC 容抗值恒定，在机电暂态特性研究中宜采用参数恒定的电容器来表示。

TCSC 可实现等效容抗的平滑调节，对 TCSC 的机电暂态分析内容主要包括对装设 TCSC 的电力系统的暂态过程研究、动态稳定性研究（如阻尼低频振荡的控制策略研究）以及 TCSC 的系统控制策略研究。

在电力系统机电暂态分析和系统控制策略研究中，TCSC 的中层和底层控制以及电容器上的过渡过程可用惯性延迟环节来模拟。

在电力系统的机电暂态过程分析中，TCSC 的仿真模型应包含以下三个部分，如图 B.2 中所示：

- a) 反映系统控制策略的控制环节，其主要功能是提高电力系统的暂态稳定性和抑制系统低功率振荡等；
- b) 反映中层、底层控制以及系统一次设备过渡过程的一阶惯性延迟环节，惯性环节的时间常数基本上与中层控制响应时间对应，通常取 0.03s~0.10s；
- c) 反映 MOV 过电压保护和电容器短时过载能力的限幅环节，限幅环节取决于 TCSC 工作能力及工作范围曲线。

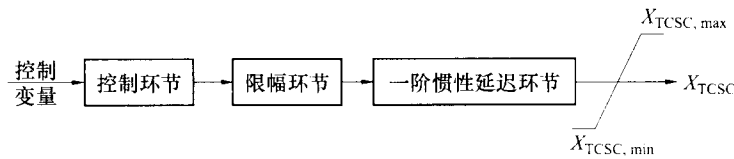


图 B.2 TCSC 机电暂态过程模型示意图

如需要模拟非线性 MOV 在电力系统机电过程中的影响，可假设线路电流波形仍保持正弦波，从而得到 Goldsworthy 的线性化模型，即串补装置和 MOV 的等效电容和电阻与不同线路电流的关系。

B.3 电磁暂态分析模型

FSC 的电磁暂态模型是由一组分别描述电容回路、MOV 回路的微分方程及 MOV 电压电流关系式构成。

TCSC 的电磁暂态模型是由一组分别描述电容回路、阀控电抗器回路、MOV 回路的微分方程及 MOV 电压电流关系式构成。

在电磁暂态分析研究过程中，需要建立的模型主要包括：

- a) 装设串补装置的输电系统模型，包括发电机组、变压器、线路、高压并联电抗器、线路 MOA 等元件的电磁暂态仿真模型；
- b) 对于 TCSC，在建立电容器组、MOV、间隙、旁路开关、阻尼装置等主设备或子系统的电磁暂态仿真模型以及过电压保护控制策略仿真的基础上，还应建立晶闸管等元件的电磁暂态仿真模型并考虑对 TCSC 阻抗调节及晶闸管触发控制策略的仿真；
- c) 线路继电保护系统、线路与串补装置之间的联动策略。

附 录 C  
(资料性附录)  
典型串补装置工程的设备参数

本附录以 500kV 平果可控串补工程为例，对设备参数进行介绍。可控串补的提升系数为 1.0~3.0(标幺值)。

C.1 电容器组及电容器

表 C.1 FSC 电容器组参数

参 数 名 称	数 值
额定电压 kV	58.4
额定电流 A	2000
额定频率 Hz	50
额定电容 μF	109
额定容抗 Ω	29.2
额定容量 Mvar	350.4
保护水平 标幺值	2.3
连接型式	H
串联数	4+4
并联数	11+11

表 C.2 FSC 电容器组过负荷能力

电 流 A	额定电压 标幺值	时 间
3600	1.80	10s
3000	1.50	2h 内允许持续 10min
2700	1.35	6h 内允许持续 30min
2200	1.10	24h 内允许持续 8h

表 C.3 TCSC 电容器组参数

参 数 名 称	数 值
额定电压 kV	9.13
额定电流 A	2000

表 C.3 (续)

参 数 名 称	数 值
额定频率 Hz	50
额定电容 μF	767
基本容抗 Ω	4.15
额定阻抗 Ω	4.57
额定容量 Mvar	55
保护水平 标么值	2.4
连接型式	H
串联	1+1
并联	10+10

表 C.4 TCSC 部分电容器组过负荷能力

电流 A	额定电压 标么值	时 间
3960	1.980	10s
3300	1.650	2h 内允许持续 10min
2970	1.485	6h 内允许持续 30min
2420	1.210	24h 内允许持续 8h

表 C.5 电 容 器 主 要 参 数

参 数 名 称	FSC		TCSC	
	单台	电容器组	单台	电容器组
额定电压 kV	7.3	58.4	4.98	9.13
额定电流 A		2000		2000
电容量 μF	40	109	76	767
阻抗 Ω		29.2		4.15
容量 Mvar	0.664	350.4	0.598	55
内部放电电阻 MΩ	2.4		1.4	
质量 kg	82		88	
保护水平（峰值） kV		190（2.3 标么值）		31（2.4 标么值）

C.2 金属氧化物限压器

表 C.6 整组 MOV 技术参数

参 数 名 称	FSC 并联 MOV	TCSC 并联 MOV
标称电压 kV	58.4	9.3
限制电压（峰值） kV	190	31
最大 MOV 电流（峰值） kA	30	10
能量 MJ	36.8	6.0
每相并联台数 （冗余）	12+2	12+2

表 C.7 MOV 单元技术参数

参 数 名 称	FSC 并联 MOV	TCSC 并联 MOV	晶闸管阀并联 MOV
额定电压（峰值） kV	98	17	19
持续运行电压 kV	69	12	15
标准泄放电流 kA	20	20	20
高脉冲电流 kA	100	100	100
脉冲能量值 kJ	2460	429	360
压力释放电流 kA	65	65	65
瓷套内并联柱数	4	4	3
每柱的 MOV 阀片数	20	6	7

C.3 间隙

表 C.8 间隙 技 术 参 数

参 数 名 称	数 值
可调闪络电压范围（峰值） kV	180～230
强迫触发电压（峰值） kV	190
去游离时间 ms	<400（幅值 30kA 的电流持续 50ms 时）



表 C.8（续）

参 数 名 称	数 值
通流能力 kA	40（持续 1.0s）
基本冲击绝缘水平（峰值） kV	450
总质量 kg	2320

C.4 阀控电抗器

表 C.9 阀控电抗器主要参数

额定感抗 mH	额定电流 A	动态短路电流额定值（峰值） kA	冷却方式
2.1	1439	102	空气自然冷却

表 C.10 运行期间允许电流

时间	10s	2h 内允许持续 10min	6h 内允许持续 30min	12h 内允许持续 8h
电流 A	3522	2935	2641	2312

C.5 阻尼装置

表 C.11 阻尼电抗器参数

电抗器	额定感抗 mH	最大摆动电流 A	1s 额定短时耐受电流 $I_{th,1s}$ kA	额定峰值耐受电流 $I_{dyn}$ kA	冷却方式
FSC	0.4	3960	40	102	空气自然冷却
TCSC	0.2	3960	40	102	空气自然冷却

表 C.12 阻尼电阻器参数

电 阻 器	额定阻抗 $\Omega$	能量吸收能力 MJ
FSC	3	5
TCSC	1	1.5

表 C.13 阻尼装置的小间隙参数

间 隙	石墨间隙 mm	闪络电压范围（峰值） kV
FSC	5+2/-0	30~40
TCSC	15+2/-0	10~15

C.6 晶闸管阀

表 C.14 LTT 晶闸管元件及其附件参数

元件	说 明	参 数
$C_S$	每级晶闸管阀的缓冲电容	4.0 $\mu$ F
$R_S$	每级晶闸管阀的缓冲电阻	22 $\Omega$
$R_{dc}$	每级晶闸管阀的直流均压电阻	2 $\times$ 75k $\Omega$
MSC	多路星型耦合器	2 $\times$ 3 $\times$ 14 型
TVM	晶闸管阀电压监测模块	晶闸管控制电抗器型

表 C.15 LTT 晶闸管技术参数

项 目	符号	额定参数
可重复正向断开状态电压峰值 V	$V_{DRM}$	$\geq 4950$
可重复反向断开状态电压峰值 V	$V_{RRM}$	$\geq 4950$
正向关断电流峰值（在结温 $v_j$ 为 5 $^{\circ}$ C $\sim$ 120 $^{\circ}$ C、 $U_D$ 为 4800V 时） mA	$I_D$	$\leq 500$
反向关断电流峰值（在结温 $v_j$ 为 5 $^{\circ}$ C $\sim$ 120 $^{\circ}$ C、 $U_R$ 为 4800V 时） mA	$I_R$	$\leq 500$
正常运行电流（结温 $v_j$ =100 $^{\circ}$ C） A	$I_T$	5000
接通状态电流的临界上升率 A/ $\mu$ s	$di/dt$	300
断开状态电压的临界上升率 V/ $\mu$ s	$du/dt$	2000
运行中允许的结温范围 $^{\circ}$ C	$v_j$	5 $\sim$ 120
最小触发功率 mW	$P_{LM}$	40
触发脉冲宽度 $\mu$ s	$\lambda$	10
高压套管基本冲击绝缘水平 kV		75
低压套管基本冲击绝缘水平 kV		75
允许最低环境温度（干球温度计） $^{\circ}$ C		1.3
允许最高环境温度（干球温度计） $^{\circ}$ C		40.9
允许相对湿度		5% $\sim$ 85%
设计寿命		>25 年

表 C.16 TCSC 最小运行阻抗

线路电流 A	最小运行阻抗 $\Omega$	线路电流 A	最小运行阻抗 $\Omega$
200	7.04	500	4.64
230	6.44	550	4.54
250	6.14	600	4.47
260	6.00	700	4.36
280	5.77	800	4.30
300	5.57	900	4.26
330	5.33	1000	4.23
360	5.15	1100	4.21
400	4.95	1200	4.20
450	4.77	1362	4.14

C.7 互感器

表 C.17 互感器技术参数

TA 号	用途	变比	精度	$I_{th,1s}$ kA	额定电压 kV
T101	线路	2000/0.5/0.5	5P40	40	3.6
T102	线路				
T21	金属氧化物限压器				
T210	金属氧化物限压器				
T400	金属氧化物限压器				
T50	间隙				
T601	平台				
T602	平台				
T70	旁路开关				
T80	旁路开关				
T11	线路	2000/0.707/0.707	0.5M5	40	3.6
T311	电容不平衡	3/0.025/0.025	5P6	1.5	72.5
T312	电容不平衡				
T40	阀	2000/0.5/0.5	5P40	40	3.6
T30	电容电压	20000/5/5 40000/10/10	0.5	—	52

C.8 光纤柱

表 C.18 光 纤 柱 参 数

项 目	FSC 用光纤柱	TCSC 用光纤柱	晶闸管阀用光纤柱
光纤芯数	28+8	32	32+9
额定频率 Hz	50	50	50
额定电压 kV	500	500	500
最大相电压 kV	318	318	318
适用温度 ℃	-30~+50	-30~+50	+5~+50

C.9 串补平台

每相串补平台的尺寸为 22m×8m，距离地面的高度为 6m。每相串补平台由 12 根支柱绝缘子支撑，由 14 条斜拉绝缘子固定。串补平台自振频率低于 1.5Hz。

C.10 旁路开关

表 C.19 旁 路 开 关 电 气 参 数

项 目	参 数
对地绝缘水平 kV	550
断口绝缘水平 kV	170
频率 Hz	50
额定电流 A	4000
热稳定电流 kA	50
动稳定电流 kA	125
短时承受时间 s	3
操作循环	合—分—合—30s—分—合

表 C.20 旁 路 开 关 动 作 时 间 ms

项 目	参 数
最小命令持续时间	40
合闸时间	50±3

表 C.20 (续)

项 目	参 数
分闸时间	36±3
灭弧时间	≤21
分合时间	63±12

表 C.21 旁路开关 SF<sub>6</sub> 气体技术参数 bar

项 目	参 数
额定压力值	6.0
报警值	5.2
闭锁值	5.0
设备停运时最低压力值	3.0

表 C.22 旁路开关操动机构技术参数

项 目	参 数
液压油起始压力 MPa	20.0
每分钟打压体积 dm <sup>3</sup> /min	0.7
油压范围 MPa	25.0~37.5
安全阀动作压力 MPa	37.5
泵启动油压 MPa	23.0
重合闸闭锁压力 MPa	30.8
合闸闭锁压力 MPa	27.3
分、合闸闭锁压力 MPa	25.3

表 C.23 旁路开关建压时间

项 目	参 数	参 数	参 数	参 数
分、合闸	分	合	合分	合-分-合
油起始压力 MPa	31.6	31.6	31.6	30.5
油终止压力 MPa	29.8	30.0	28.7	29.6
建压时间 s	19	17	38	31

C.11 隔离开关

表 C.24 隔离开关电气参数

名 称	型 式	额定电压 kV	额定电流 A
旁路隔离开关	水平触及式无接地开关	550	3150
串联隔离开关	水平触及式带单接地开关	550	3150

隔离开关有远方、就地及闭锁三种操作方式。无论就地或远方操作方式，电动操作均为三相联动。就地操作方式可实现手动操作，为单相动作。

C.12 冷却系统

表 C.25 冷却系统参数

项 目	参 数
系统容量 L	1000
额定流量 L/min	502
循环处理流量 L/min	10
最大额定水电导率 μS/cm	<0.5
设计压力 MPa	0.8
冷却能力 kW	130
最大的晶闸管阀冷却水温度 ℃	50
最高室内温度 ℃	40
最低室内温度 ℃	5
最高室外温度 ℃	40.9
最低室外温度 ℃	>0
主电源 V	VAC: 380+15%/-10% (50Hz) VDC: 125

**附 录 D**  
**(规范性附录)**  
**晶闸管阀的损耗计算方法**

理论上, 测量出单个模块或晶闸管级的损耗后可计算出晶闸管阀的总损耗。然而, 这些测量实际上很难实现。下面的计算方法可作为一个统一的标准取代上述测量。

**D.1 晶闸管阀的总损耗**

晶闸管阀的总损耗可按式 (D.1) 计算:

$$P_v = P_{cv} + P_{Tsw} + P_{vd} + P_{sn} \quad (D.1)$$

式中:

- $P_v$ ——晶闸管阀的总损耗;
- $P_{cv}$ ——晶闸管阀的通态损耗;
- $P_{Tsw}$ ——晶闸管阀的开关损耗, 为开通损耗和关断损耗之和;
- $P_{vd}$ ——晶闸管阀均压回路的损耗;
- $P_{sn}$ ——晶闸管阀阻尼回路的损耗。

**D.2 晶闸管阀的通态损耗**

对于晶闸管阀的不同触发角, 可估算出晶闸管阀通态平均电流以及晶闸管阀电流。  
晶闸管阀的通态损耗可按式 (D.2) 计算:

$$P_{cv} = 3 \times 2 \times [n(U_{T0} I_{TAV} + r_T I_{Trms}^2) + R_b I_{Trms}^2] \quad (D.2)$$

式中:

- $n$ ——阀体中串联的晶闸管级数;
- $U_{T0}$ ——晶闸管的门槛电压;
- $I_{TAV}$ ——晶闸管阀通态平均电流;
- $r_T$ ——晶闸管的斜率电阻;
- $I_{Trms}$ ——晶闸管阀电流;
- $R_b$ ——不考虑晶闸管时的阀端间电路直流电阻。

**D.3 晶闸管阀的开通损耗**

晶闸管阀的开通损耗可按式 (D.3) 估算:

$$P_{Tswon} = 3 \times 2 n P_{pulse} f \quad (D.3)$$

式中:

- $P_{Tswon}$ ——晶闸管开通损耗;
- $P_{pulse}$ ——每个触发脉冲的开通损耗;
- $f$ ——系统额定频率。

**D.4 晶闸管阀的关断损耗**

晶闸管阀的关断损耗可按式 (D.4) 计算:

$$P_{Tswoff} = 3 \times 2 Q_{tr} \times \sqrt{2} U_1 \sin(\alpha) f \quad (D.4)$$

式中:

$P_{\text{Tswoff}}$  ——晶闸管关断损耗;  
 $Q_{\text{rr}}$  ——晶闸管恢复电荷;  
 $U_1$  ——阀连接电压 (工频幅值)。  
 $Q_{\text{rr}}$  定义为:

$$Q_{\text{rr}} = k_1 (dI_{\text{T}} / dt)^{0.6} \tag{D.5}$$

式中:

$k_1$  ——晶闸管型号规定的参数, 是通过试验获得的估计值 (表示在相应的运行结温下晶闸管存储电荷与关断时的  $dI_{\text{T}} / dt$  之间的关系);  
 $dI_{\text{T}} / dt$  ——电流过零点时的上升率, A/ $\mu\text{s}$ 。

D.5 晶闸管阀均压回路损耗

晶闸管阀均压回路的损耗取决于晶闸管阀两端的电压, 可按式 (D.6) 计算:

$$P_{\text{vd}} = 3U_{1\alpha}^2 / (R_{\text{vd}} n) \tag{D.6}$$

式中:

$R_{\text{vd}}$  ——均压电阻值 (每一级);  
 $U_{1\alpha}$  ——晶闸管闭锁时的电压。

D.6 晶闸管阀阻尼回路损耗

晶闸管阀阻尼回路的损耗可按式 (D.7) 估算:

$$P_{\text{sn}} = 3fC_{\text{sn}} / n [\sqrt{2}U_1 \sin(\alpha)]^2 \times 2.0 \tag{D.7}$$

式中:

$C_{\text{sn}}$  ——阻尼回路电容值 (每一级)。



附 录 E  
(资料性附录)

串补装置的典型监控系统连接图

串补装置的站控层主要由后台监控系统（操作员工作站）、远动系统（远动主站）、工程师站以及故障信息子站 4 个系统组成。串补装置的控制保护系统采用两套完全独立运行的冗余配置，通信网络也采用双网配置，即监控 A 网和监控 B 网。

串补装置的典型监控系统连接图如图 E.1 所示，控制保护系统 A/B 通过监控双网和故障信息录波网与站控层双向通信。控制保护系统 A 将保护动作信息上传到监控 A 网和故障信息录波网，同时通过录波管理机 A 将录波信息上传到故障信息录波网；控制保护系统 B 将保护动作信息上传到监控 B 网和故障信息录波网，同时通过录波管理机 B 将录波信息上传到故障信息录波网。站控层的操作员工作站 A/B、远动主站 A/B 以及工程师站通过主动巡检方式从监控网获取所需信息，故障信息子站通过故障信息录波网获取录波信息。操作员工作站 A/B 将保护定值等信息通过监控网下达到控制保护系统 A/B；远动主站将上级调度的信息通过监控网下达到控制保护系统 A/B。

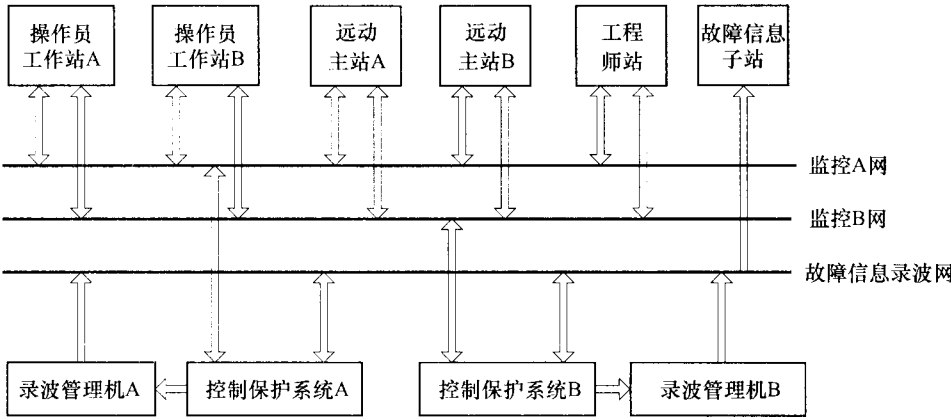


图 E.1 串补装置的典型监控系统连接图

中 华 人 民 共 和 国  
电 力 行 业 标 准  
串联电容器补偿装置 设计导则  
DL/T 1219 — 2013

\*

中国电力出版社出版、发行  
(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cep11.sgcc.com.cn>)  
北京九天众诚印刷有限公司印刷

\*

2013年8月第一版 2013年8月北京第一次印刷  
880毫米×1230毫米 16开本 3印张 6千字  
印数 0001—3000册

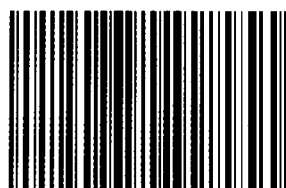
\*

统一书号 155123·1620 定价 **25.00**

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



155123.1620

上架建议：规程规范/  
电工技术

