



---

# 工厂供电无功补偿系统及其谐振特性分析 虚拟仿真实验

# 实 验 指 导 书

泰州学院船舶与机电工程学院

# 目 录

实验一 系统负荷分析与无功补偿实验.....	1
实验二 无功补偿电容器合闸高频涌流分析与抑制实验.....	11
实验三 电容器无功补偿系统谐振特性分析与抑制实验.....	19

## 实验一 系统负荷分析与无功补偿实验

### 一、实验目的

1. 掌握供配电系统的负荷、功率因数、损耗等相关计算方法。
2. 掌握无功补偿系统的关键设备、导体、并联电容器、一次系统电路等综合设计方法。
3. 理解无功补偿对于工厂供配电系统节能降耗的原理和意义。
4. 熟悉供配电系统的规范化操作流程。

### 二、实验原理

某机加工车间的变电所，10kV 高压进线为 2km YJV22 3×25 电缆，低压侧负荷拥有金属切削机床功率共 920kW，通风机功率共 56kW，吊车功率共 76kW（额定负荷持续率  $\varepsilon_N=40\%$ ），电焊机功率共 81kW（额定负荷持续率  $\varepsilon_N=60\%$ ），照明负荷功率共 38.16kW（荧光灯，电子镇流器），低压线路额定电压 380V（不计低压线路的功率损耗）。要求在配电变压器低压侧通过恰当的无功补偿系统配置，确保变压器高压侧功率因数不低于 0.9。

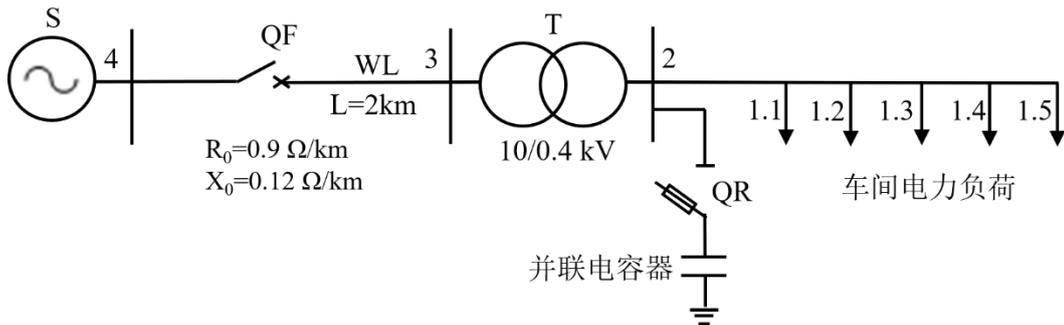


图 1-1 工厂车间供电系统示意图

1. 车间各用电设备组的负荷计算方法（需要系数法）

$$P_{c1.i} = K_d P_{e1.i\Sigma}$$

$$Q_{c1.i} = P_{c1.i} \tan\varphi$$

$$S_{c1.i} = \sqrt{P_{c1.i}^2 + Q_{c1.i}^2}$$

$$I_{c1.i} = \frac{S_{c1.i}}{\sqrt{3}U_{N1}}$$

$P_{e1.i\Sigma}$  为该用电设备组设备容量之和 (kW)； $\tan\varphi$  为该用电设备组的功率因数角的正切值； $k_d$  为该用电设备组的需要系数。

2. 无功补偿前车间的计算负荷和功率因数分析方法

(1) 变压器低压侧的计算负荷

$$P_{c2} = K_{\Sigma p} \sum_{i=1}^5 P_{c1.i}$$

$$Q_{c2} = K_{\Sigma q} \sum_{i=1}^5 Q_{c1.i}$$

$$S_{c2} = \sqrt{P_{c2}^2 + Q_{c2}^2}$$

$$I_{c2} = \frac{S_{c2}}{\sqrt{3}U_{N2}}$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{P_{c2}}{S_{c2}}$$

无功补偿前，变压器低压侧的向量关系如图 2 所示。

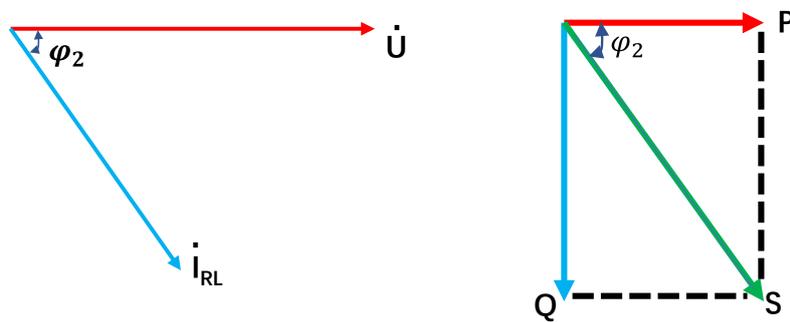


图 1-2 无功补偿前的向量关系

(2) 变压器的功率损耗

$$\Delta P_T = 0.015S_{c2}$$

$$\Delta Q_T = 0.06S_{c2}$$

(3) 变压器高压侧的计算负荷

$$P_{c3} = P_{c2} + \Delta P_T$$

$$Q_{c3} = Q_{c2} + \Delta Q_T$$

$$S_{c3} = \sqrt{P_{c3}^2 + Q_{c3}^2}$$

$$I_{c3} = \frac{S_{c3}}{\sqrt{3}U_{N3}}$$

$$\cos \varphi_3 = \frac{P_{c3}}{S_{c3}}$$

装设单台变压器时，其额定容量  $S_N$  应能满足全部用电设备的计算负荷，考虑负荷发展应留有一定的容量裕度，并考虑变压器的经济运行，即

$$S_N \geq (1.15 \sim 1.4)S_{c3}$$

(4) 高压线路的功率损耗

$$\Delta P_{WL} = 3I_{c3}^2 R_{WL} \times 10^{-3} = 3I_{c3}^2 R_0 L \times 10^{-3}$$

$$\Delta Q_{WL} = 3I_{c3}^2 X_{WL} \times 10^{-3} = 3I_{c3}^2 X_0 L \times 10^{-3}$$

其中， $R_0$ 为线路单位长度电阻， $X_0$ 为线路单位长度电抗。

(5) 高压进线侧的计算负荷

$$P_{c4} = P_{c3} + \Delta P_{WL}$$

$$Q_{c4} = Q_{c3} + \Delta Q_{WL}$$

$$S_{c4} = \sqrt{P_{c4}^2 + Q_{c4}^2}$$

$$I_{c4} = \frac{S_{c4}}{\sqrt{3}U_{N4}}$$

$$\cos \varphi_4 = \frac{P_{c4}}{S_{c4}}$$

### 3. 无功补偿电容器配置原则

车间中由于有大量的感应电动机、电焊机及气体放电灯等感性负荷，从而使功率因数降低。如在充分发挥设备潜力、改善设备运行性能，提高其自然功率因数的情况下，尚达不到规定的功率因数要求时，根据 GB50052-2009《供配电系统设计规范》和 GB3485-1998《评价企业合理用电技术导则》等规定，在采用上述提高自然功率因数的措施后仍达不到规定的功率因数要求时，应合理装设无功补偿设备，以人工补偿方式来提高功率因数。本实验无功补偿采用并联电力电容器在低压侧集中补偿的方式，考虑到变压器的无功损耗远大于有功损耗，初步设定低压侧补偿后的功率因数为 0.92 来计算需补偿的容量。

(1) 确定补偿容量

$$Q_{c.c} = P_{c2}(\tan \varphi_2 - \tan \varphi_2')$$

(2) 补偿电容器选型

根据可选并联电容器参数，计及工作电压与额定电压的差异，确定单台电容器实际输出容量

$$Q_c = Q_{N.c} \left( \frac{U_{av.c}}{U_{N.c}} \right)^2 = 30 \times \left( \frac{0.23}{0.25} \right)^2$$

其中， $U_{N.c}$ 为电容器额定电压， $Q_{N.c}$ 为电容器额定输出容量， $U_{av.c}$ 为并联电容器的平均运行电压，取系统标称相电压 0.22kV 的 1.05 倍。

需要电容器的数量为

$$n = \frac{Q_{c.c}}{Q_c}$$

实际补偿容量

$$Q_{c.c} = nQ_c$$

#### 4. 无功补偿后车间的计算负荷和功率因数分析方法

计及实际补偿的无功功率，按照 2 的步骤再次分析各参数的变化。图 1-3 表示功率因数的提高与无功功率和视在功率变化的关系。假设功率因数由  $\cos\varphi$  提高到  $\cos\varphi'$ ，这时在负荷需要的有功功率  $P$  不变的条件下无功功率  $Q$  减小  $Q_{c.c}$ ，相应地负荷电流  $I$  也得以减小，这将使系统的电能损耗和电压损耗相应降低，既节约了电能，又提高了电压质量，而且可选较小容量的供电设备和导线电缆，因此提高功率因数对配电系统大有好处。

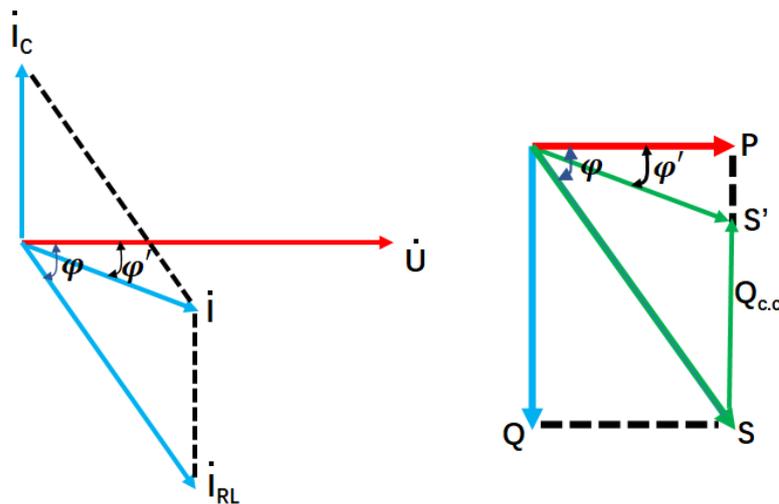


图 1-3 无功补偿后的向量关系

#### 5. 电容器柜电气设备选型原则

(1) 参照《并联电容器装置设计规范》、《低压电容器柜技术规范》技术参数。

(2) 设备类型包括隔离开关熔断器组、电流互感器、避雷器、熔断器、热继电器、交流接触器。

#### 6. 电容器柜导体选型原则

根据允许载流量选择导体的截面积，本实验设定为铜芯聚氯乙烯绝缘软导体 (BVR)。

##### (1) 相导体的计算电流

计算电流  $I_{c,\varphi}$  的选取：对电容器的引入线，考虑电容器充电时有较大的涌流，低压电容器的引入线取电容器电流的 1.5 倍。

$$I_{c,\varphi} = 1.50 \times I_{c.c}$$

通过相导体的计算电流  $I_{c,\varphi}$  不超过其允许电流  $I_{al}$ ，即

$$I_{c.\varphi} \leq I_{al}$$

根据 $I_{c.\varphi}$ ，查表获得环境温度 25℃、最高允许温度 70℃的相近允许载流量 $I_{al}$ ，及其对应的导体截面积 $S_{\varphi}$ 。

#### (2) 温度校正

实际环境温度与参考环境温度不一致时，允许载流量 $I_{al}$ 需乘上温度修正系数 $K_{\theta}$ ，以求出实际的允许载流量

$$I'_{al} = K_{\theta} I_{al}$$
$$K_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_{al} - \theta'_0}{\theta_{al} - \theta_0}}$$

式中 $\theta_{al}$ 为导体正常发热最高允许温度，本实验取 70℃； $\theta_0$ 为导体允许载流量的参考环境温度，本实验取 25℃； $\theta'_0$ 为导体敷设处的实际环境温度，取当地最热月的日最高温度平均值本实验取取 40℃。

#### (3) 根据实际允许载流量进行校验

$$I_{c.\varphi} \leq I'_{al}$$

如不满足则，重新选择更大的导体截面积 $S_{\varphi}$ 。

#### (4) 中性导体的截面 $S_0$ 选择

当 $S_{\varphi} \leq 16mm^2$ ， $S_0 = S_{\varphi}$ ；

当 $S_{\varphi} \geq 16mm^2$ ， $S_0 = 0.5S_{\varphi}$

### 7. 送停电倒闸操作规程

(1) 如是固定式高压开关柜，停电时--先断开高压断路器，再断开高压隔离开关，送电时--顺序与此相反，严禁带负荷拉合隔离开关；如是手车式开关柜，停电时--断开断路器，进入热备用状态，送电时--合上断路器，进入运行状态。

(2) 变压器两侧断路器的操作顺序规定如下：送电时--先投入电源侧断路器，后投入负荷侧断路器，停电时--顺序与此相反。（即不能带负载切断电源）。

(3) 送电时必须先送负载，后送电容柜；停电时必须先停电容柜，后停负载。

## 三、实验内容和步骤

### 1. 车间各用电设备组的计算负荷

表 1-1 车间各用电设备组计算负荷

设备名称	设备容量 $P_N$ (kW)	$K_d$	$\cos\varphi$	$\tan\varphi$	$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kVar)	$S_c$ (kVA)	$I_c$ (A)
机床	920	0.20	0.50	1.73				
通风机	56	0.80	0.80	0.75				
吊车	76	0.25	0.50	1.73				
电焊机	81	0.35	0.60	1.33				
照明	38.16	0.90	0.98	0.20				

2. 无功补偿前车间的计算负荷和功率因数分析（取同时系数 $K_{\Sigma p} = 0.95$ ， $K_{\Sigma q} = 0.97$ ）

表 1-2 无功补偿前的计算负荷和功率因数

项目	计算负荷				$\cos\varphi$
	$P_c$ (kW)	$Q_c$ (kVar)	$S_c$ (kVA)	$I_c$ (A)	
变压器低压侧计算负荷					
变压器功率损耗			/	/	/
变压器高压侧计算负荷					
高压线路功率损耗			/	/	/
高压进线侧计算负荷					

3. 无功补偿电容器配置

现变压器低压侧最大负荷时功率因数只有 0.58，要求变压器高压侧功率因数不低于 0.9，采用低压集中补偿方式，考虑到变压器的无功损耗远大于有功损耗，初步设定低压侧补偿后的功率因数为 0.92 来计算需补偿的容量。

(1) 计算需补偿的容量

(2) 现有自愈式低电压并联电容器 BZMJ0.25-30-4Yn（星形连接，额定相电压 0.25kV，额定总输出 30kvar，额定单相电容 509.3uf，额定单相电流 40A），计算所需的电容器台数。

(3) 计算投入上述所需台数的电容器后的实际补偿容量

4. 无功补偿后车间的计算负荷和功率因数分析

表 1-3 无功补偿后车间的计算负荷和功率因数

项目	计算负荷				cos φ
	P <sub>c</sub> (kW)	Q <sub>c</sub> (kVar)	S <sub>c</sub> (kVA)	I <sub>c</sub> (A)	
变压器低压侧计算负荷					
变压器功率损耗			/	/	/
变压器高压侧计算负荷					
高压线路功率损耗			/	/	/
高压进线侧计算负荷					

5. 电容器柜电气设备和导体选型

表 1-4 电容器柜设备选型

设备类型	型号
熔断器	
交流接触器	
热继电器	
隔离开关熔断器组	
电流互感器	
避雷器	
相导体	

6. 电容器柜电气设备接线

按照图 1-4 所示的电容柜电气主接线图，放置设备并进行接线。

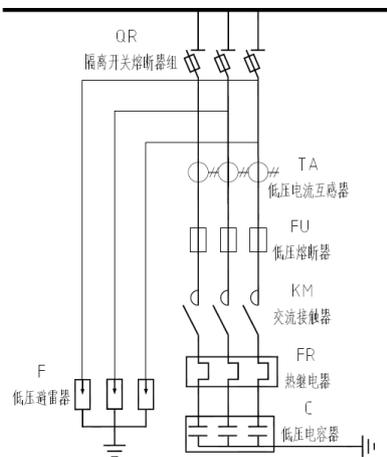


图 1-4 电容柜电气主接线图

## 7. 送（停）电倒闸操作和相关参数测量

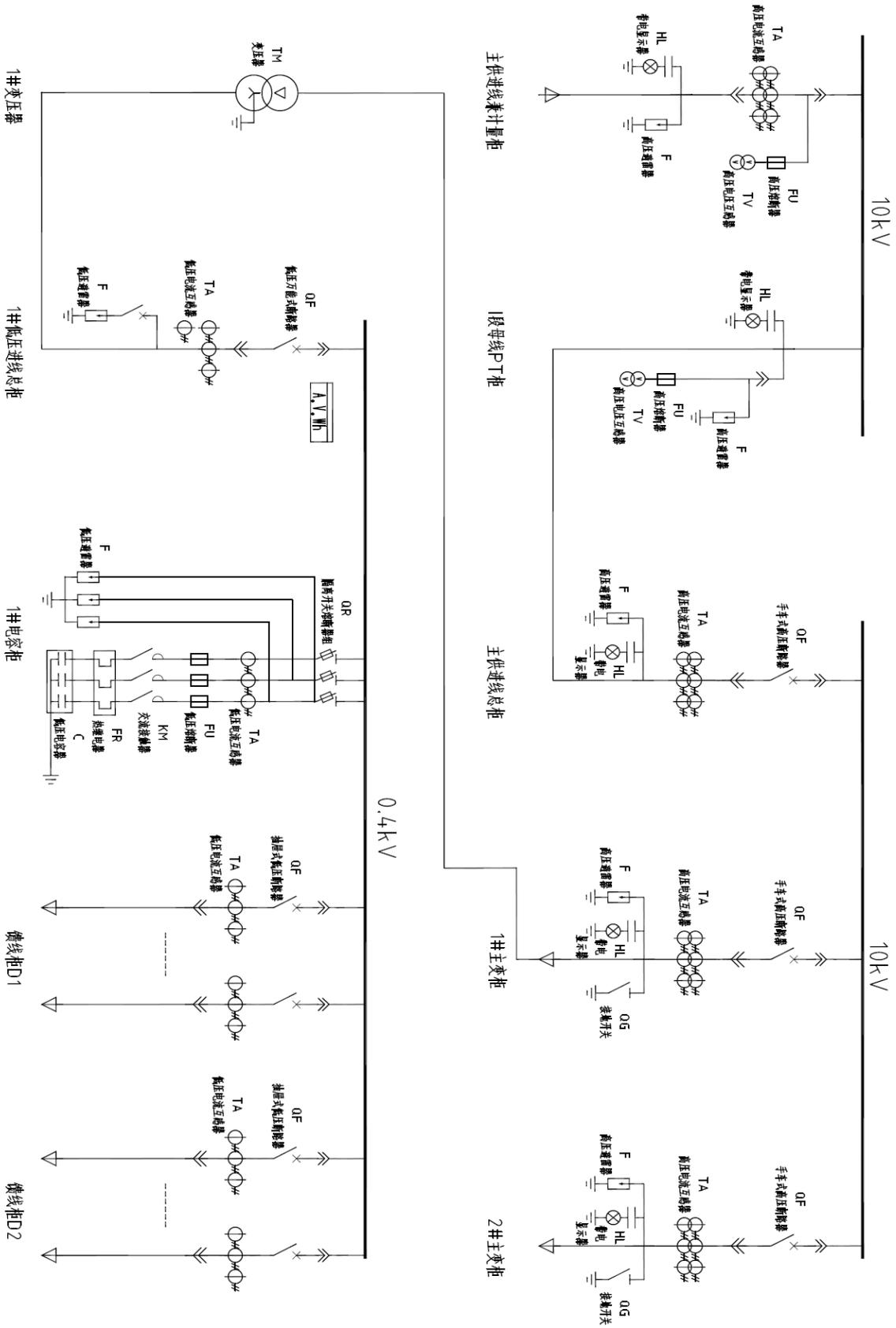


图 1-5 配电室电气主接线图

(1) 根据图 1-5 所示配电室电气主接线图进行送电合闸操作。

(2) 相关测量参数

表 1-5 变压器高低压侧各功率及功率因数

仪表位置	项目	未投 电容器	投入 3 组 电容器	投入 6 组 电容器	投入 9 组 电容器	投入 12 组电容器
低 压 计 量 柜	有功功率 P (kW)					
	无功功率 Q (kVar)					
	视在功率 S (kVA)					
	功率因数 $\cos \varphi$					
高 压 计 量 柜	有功功率 P (kW)					
	无功功率 Q (kVar)					
	视在功率 S (kVA)					
	功率因数 $\cos \varphi$					

(3) 根据图 1-5 所示配电室电气主接线图进行停电拉闸操作。

## 8. 节能分析

对无功功率补偿前后变压器有功功率损耗、变压器无功功率损耗、高压线路有功功率损耗以及高压线路无功功率损耗进行对比分析。

## 四、思考题

1. 如果并联无功补偿电容器采用 17 组 BZMJ0.25-30-4Yn 电容器，功率因数会发生什么变化？对车间的供配电系统会带来什么影响？
2. 对于固定式高压开关柜，在进行停电操作时，如果在断路器未断开情况下，直接拉开负荷侧隔离开关（刀闸）会出现什么情况？

3. 在停电操作时，为什么必须先停电容柜，后停负载？同样，在送电操作时，为什么必须先投入负载，后投入电容柜？

## 五、实验报告

1. 归纳总结本实验结论。
2. 实验过程总结，比如实验中遇到了哪些困难，如何解决，有哪些需要特别注意的事项，实验收获等。

## 实验二 无功补偿电容器合闸高频涌流分析与抑制实验

### 一、实验目的

1. 熟悉无功补偿电容器合闸高频涌流的暂态特性。
2. 熟悉串联电抗器的高频涌流抑制方法。
3. 培养学生独立解决问题及综合实践能力，并通过供配电系统的规范化操作训练，培养学生的工程意识、动手能力和实践经验。

### 二、实验原理

本实验电容器无功补偿系统单相等效电路模型如图 2-1 所示，忽略电网背景谐波和负载影响，主要由电源电压  $U_s$ 、系统阻抗  $Z_s$ 、并联电容  $C$  及串联电抗器  $L_c$  组成。

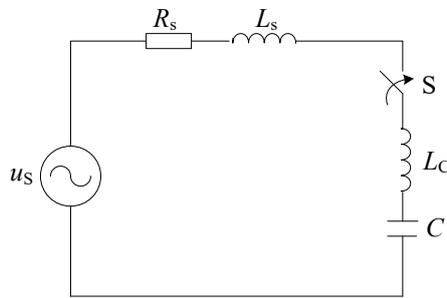


图 2-1 电容器无功补偿系统单相等效电路

#### 1. 电路参数说明

##### (1) 电源电压

系统电源电压为工厂供电高压进线电压，电力系统近似为无限大容量供电系统。 $U_s$  为折算至车间变压器二次侧的低压电压值。

##### (2) 系统阻抗 $Z_s$

系统阻抗  $Z_s$  由电力系统阻抗、变压器等效阻抗和高压线路阻抗组成，其中：

##### 1) 电力系统阻抗

工程中，电力系统的短路容量可由工厂变电所高压馈电线出口断路器的断流容量  $S_{oc}$  来估算，则电力系统电抗为：

$$X_{oc} = \frac{U_{c2}^2}{S_{oc}} \quad (1)$$

式中， $U_{c2}$  为车间变压器低压侧的计算电压，kV。

##### 2) 工厂供电高压线路阻抗计算

根据线路型号，查阅相关手册或产品样本，可以获得单位长度电阻  $R_0$  和电抗  $X_0$

( $\Omega/\text{km}$ )，设线路长度为  $l$  (km)，则折算后的线路阻抗为：

$$\begin{cases} R_{\text{WL}} = R_0 \times l \times \left( \frac{U_{c2}}{U_{c1}} \right)^2 \\ X_{\text{WL}} = X_0 \times l \times \left( \frac{U_{c2}}{U_{c1}} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中， $U_{c1}$ 、 $U_{c2}$  分别为车间变压器高压侧和低压侧的计算电压，kV。

### 3) 变压器的等效阻抗

变压器的等效阻抗  $Z_T$  计算如下：

$$\begin{cases} R_T = \Delta P_k \times \left( \frac{U_{N2}}{S_N} \right)^2 \times 10^{-3} \\ Z_T = \frac{U_k \%}{100} \times \frac{U_{N2}^2}{S_N} \\ X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\Delta P_k$  为变压器短路损耗 (kW)， $U_k\%$  为变压器短路电压百分值，由相关手册或产品手册确定； $S_N$  为变压器的额定容量 (MVA)。

则本实验电路的系统总阻抗  $Z_s$  为：

$$\begin{cases} R_s = R_{\text{WL}} + R_T \\ X_s = X_{\text{oc}} + X_{\text{WL}} + X_T \end{cases} \quad (4)$$

### (3) 电容 $C$ 和串联电抗器 $L_c$

$C$  为无功补偿电容器容值， $L_c$  为电容器支路的串联电抗，主要用来抑制合闸高频涌流。

## 2. 电容合闸暂态过程分析

### (1) 电容器合闸暂态方程解析

令  $L = L_s + L_c$ ，将图 2-1 中的电抗合并，可获得典型 RLC 串联等效电路。

根据图 2-1，可以列出该电路的微分方程如下：

$$R_s C \frac{du_c}{dt} + LC \frac{du_c^2}{dt^2} + u_c = u_s \quad (5)$$

设电网电源  $u_s = U_{\text{sm}} \sin(\omega t + \varphi_s)$ ， $\omega$  为系统基波角频率， $\varphi_s$  为电源电压初相角。

二阶非线性微分方程（5）的特解和通解求解如下：

1) 特解

方程（5）的特解为电路稳态分量，定义为：

$$u_{cq} = U_{cm} \sin(\omega t + \varphi_c) \quad (6)$$

其中：

$$U_{cm} = \frac{U_{sm}}{\omega C \sqrt{R_s^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\varphi_c = \varphi_s - \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{\omega^2 LC - 1}{\omega R_s C}\right)$$

2) 通解

式（5）的特征方程为：

$$LCp^2 + R_s Cp + 1 = 0 \quad (7)$$

根据式（7），可获得该特征方程的特征根为：

$$p = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (8)$$

其中：

$$\alpha = \frac{R_s}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

在本实验工厂供电系统中，一般存在  $R_s < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ ，因此，系统处于欠阻尼状态，特征方程的特征根为一对实部为负数的共轭复数根。令  $\omega_c = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ ，则可定义电容电压的通解为：

$$u_{cz} = e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_c t + A_2 \cos \omega_c t) \quad (9)$$

结合式（8）和式（9），电容电压的全响应为：

$$u_c = e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_c t + A_2 \cos \omega_c t) + U_{cm} \sin(\omega t + \varphi_c) \quad (10)$$

根据初始条件电容电压  $u_c(0^-) = u_c(0^+) = U_{c0}$ ， $i_c(0^-) = i_c(0^+) = 0$ ，解得  $A_1$  和  $A_2$  的值：

$$\begin{cases} A_1 = \frac{\alpha(U_{c0} - U_{cm} \sin \varphi_c) - U_{cm} \omega \cos \varphi_c}{\omega_c} \\ A_2 = U_{c0} - U_{cm} \sin \varphi_c \end{cases} \quad (11)$$

根据式 (10)，可以获得电容电流的全响应：

$$i_c = C e^{-\alpha t} \left( (-\alpha A_1 - A_2 \omega_c) \sin \omega_c t + (A_1 \omega_c - \alpha A_2) \cos \omega_c t \right) + U_{cm} \omega C \cos(\omega t + \varphi_c) \quad (12)$$

代入  $A_1$  和  $A_2$  的值，可以获得：

$$i_c = C e^{-\alpha t} \left( \frac{\omega_0^2 (U_{cm} \sin \varphi_c - U_{c0}) + \alpha U_{cm} \omega \cos \varphi_c}{\omega_c} \sin \omega_c t - U_{cm} \omega \cos \varphi_c \cos \omega_c t \right) + U_{cm} \omega C \cos(\omega t + \varphi_c) \quad (13)$$

由式 (13) 可知，当满足如下条件时，合闸涌流为 0：

$$\begin{cases} u_{cm} \sin \varphi_c - U_{c0} = 0 \\ \cos \varphi_c = 0 \end{cases} \quad (14)$$

即，在合闸瞬间，当电容电压稳态瞬时值为峰值，且等于合闸前电容初始电压时，电容合闸电流为 0。

## (2) 合闸涌流峰值估算

通常来说，由于  $\alpha \ll \omega_0$ ，因此有  $\omega_c \approx \omega_0$ 。

令合闸瞬间  $\varphi_c = 90^\circ$ ，电容初值  $U_{c0} = 0$ ，则式 (13) 简化为：

$$i_c = I_m \left( e^{-\alpha t} \frac{\omega_0}{\omega} \sin \omega_c t - \sin \omega t \right)$$

则有：

$$i_{c\max} = I_m \left( 1 + \frac{\omega_0}{\omega} \right) = I_m \left( 1 + \frac{1}{\omega \sqrt{LC}} \right) = I_m \left( 1 + \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \right) \quad (15)$$

分析式 (15)，合闸涌流峰值与暂态振荡频率  $\omega_0$  相关， $\omega_0$  越大，合闸涌流峰值越大。换句话说，合闸涌流与电容容抗与系统感抗的比值  $X_c/X_L$  相关，且当  $X_c$  确定时， $X_L$  越大，合闸涌流峰值越小；相反，如果  $X_L$  仅为系统电抗，则合闸高频涌流峰值较大。因此，通常在电容器之路中串联电抗器抑制合闸涌流。

此外，假如电容器在合闸之前已经处于充电状态，如果充电电压与系统电压大小相等而方向相反时，则合闸涌流将为未充电状态时的涌流的两倍。因此，由于无法判断合闸瞬间的电压相位，为了避免产生危险的涌流，一般规定电容器在断开后，必须充分放电后才能重新合闸运行。

### (3) 合闸涌流抑制方法

工程中为了抑制电容器合闸高频涌流，当超过合闸涌流限值时（通常取电容器组额定电流的 20 倍），应装设串联电抗器加以限制，而当串联电抗器仅用于限制涌流时，电抗率宜按照 0.1%-1%选取。

需要注意的是，串联电抗器会使电容器的基波电压升高，其值为：

$$U_C = U_N \frac{X_C}{X_C - X_{Lc}} \quad (16)$$

$U_N$  为补偿回路母线额定电压。

## 三、实验内容和步骤

### 1. 电容器合闸高频涌流谐振特性分析

#### (1) 无功补偿电容器的选型、安装与接线

从补偿电容器元件库中选择型号 0.25-50-4Yn 的一组电容器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

#### (2) 观测电容器合闸高频涌流谐振特性

1) 设置电源电压合闸初始相角  $\varphi_s$  和电容初始电压  $U_{C0}$ ，特征组合值参照表 2-1，初次选择组合值 1。

表 2-1 特征组合值 ( $\varphi_s, U_{C0}$ )

$\varphi_s \backslash U_{C0}$	0°	30°	90°	210°	270°
0	必做 1	必做 2	必做 3	选做 4	选做 5
$U_m/2$	选做 6	必做 7	选做 8	必做 9	选做 10
$U_m$	选做 11	选做 12	选做 13	选做 14	选做 15

#### 2) 示波器连接

#### 3) 合闸补偿电容器柜开关。

连接示波器的差分电压测量探头和电流测量探头，分别测量电容两端电压和电容电流，图 2-2 和 2-3 为实物的示例。



图 2-2 差分电压测量仪



图 2-3 电流测量仪

4) 观测电容器电压、电流的暂态特性，典型数据包括电容电压峰值最大值  $U_{CMmax}$ 、电容电压稳态峰值  $U_{CM}$ 、电容电流峰值最大值  $I_{CMmax}$ 、电容电流峰值稳态值  $I_{CM}$  以及合闸涌流暂态过渡时间  $T$ 。

表 2-2 电容器电压合闸暂态观测数据

参数 \ ( $U_{C0}, \varphi_s$ )	(0,0°)	(0,30°)	(0,90°)	( $U_m/2,30^\circ$ )	( $U_m/2,210^\circ$ )
$U_{CMmax}$					
$U_{CM}$					
$I_{CMmax}$					
$I_{CM}$					
$T$					

5) 分闸补偿电容器柜开关。

6) 依次选择的特征组合值 2、3、7、9，重复的实验步骤 (1)、(2)、(4)。

## 2. 电容器合闸高频涌流抑制

(1) 设置电源电压合闸初始相角  $\varphi_s$  和电容初始电压  $U_{C0}$ ，选择  $U_{C0}$  为 0V， $\varphi_s$  为 90°。

## (2) 观测电容器合闸高频涌流抑制特性

### 1) 串联电抗器的选型、安装与接线

从串联电抗器元件库中的以下三组型号 CK-0.4-0.1、CK-0.4-0.5 和 CK-0.4-1 的串联电抗器中，任意选择一组串联电抗器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

### 2) 合闸补偿电容器柜开关。

3) 观测电容器电压、电流的暂态特性。典型数据包括电容电压峰值最大值  $U_{CMmax}$ 、电容电压稳态峰值  $U_{CM}$ 、电容电流峰值最大值  $I_{CMmax}$ 、电容电流峰值稳态值  $I_{CM}$ 、合闸涌流暂态过渡时间  $T$ 。

表 2-3 电容器电压合闸暂态观测数据

电抗率 观测参数	0.0%	0.1%	0.5%	1%
$U_{Cmax}$				
$U_C$				
$I_{Cmax}$				
$I_C$				
$T$				

### 4) 分闸补偿电容器柜开关。

5) 从串联电抗器元件库中选择型号为 CK-0.4-1、CK-0.4-0.1（可选）的串联电抗器，重复 1) -4) 的实验步骤。

6) 根据数据表 2-3，分析串联电抗器的电容器高频合闸涌流抑制特性。

## 四、思考题

1. 初始合闸时，电容器未充电，试分析随着电源电压合闸初相角的增加（0-90°），合闸涌流的特性变化。
2. 当电容器在合闸之前已经处于充电状态，试分析什么合闸条件下合闸涌流最大？
3. 分析串联电抗器对系统谐振频率的影响，以及对合闸涌流特性（涌流峰值、暂态过渡时间等参数）的影响。
4. 分析串联电抗器后，对电容器补偿系统的影响，包括电容器稳态端电压、电容器无功补偿容量等。工程应用中串联电抗器需要注意哪些事项？

## 五、实验报告

1. 归纳总结本实验结论。
2. 实验过程总结, 比如实验中遇到了哪些困难, 如何解决, 有哪些需要特别注意的事项, 实验收获等。

## 实验三 电容器无功补偿系统谐振特性分析与抑制实验

### 一、实验目的

1. 熟悉电容器无功补偿系统的串联或并联谐振产生机理及其特性。
2. 熟悉工程中串联电抗器的电容器谐振抑制方法。
3. 培养学生独立解决问题及综合实践能力，并通过供配电系统的规范化操作训练，培养学生的工程意识、动手能力和实践经验。

### 二、实验原理

#### 1. 串联谐振基本原理

当电网电压存在畸变时，易在电容器回路产生串联谐振，单相等效电路模型如图 3-1 所示，由电源谐波电压  $u_{sn}$ 、系统阻抗  $Z_s$ 、补偿电容  $C$  组成。

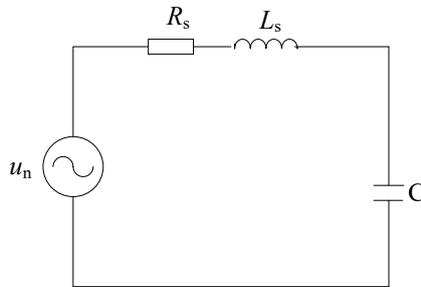


图 3-1 工厂无功补偿电容器系统串联谐振单相等效电路

参照图 3-1，根据相量法，获得回路电流方程：

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{U}_n}{R_s + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (1)$$

当电路中的谐波感抗等于谐波容抗时，也即  $\omega L_s = 1/\omega C$  时，电路发生串联谐振，此时：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} \quad (2)$$

式中， $\omega_0$  谐振角频率，完全由电路电感和电容参数决定，与线路电阻、电源电压等外部因素无关，因此又称为自然频率或固有频率。

此时，电路谐波电流有效值为：

$$I_n = \frac{U_n}{R_s} \quad (3)$$

由于系统电阻  $R_s$  非常小，串联谐振时的谐波电流将会很大。同时，这个大电流将会在电容上产生高电压，造成电容器发生绝缘击穿。因此，在进行无功补偿时，要避免串联谐振的发生。

## 2. 并联谐振基本原理

电容器无功补偿系统的并联谐振通常由负载谐波电流造成，其单相等效电路如图 3-2 所示。

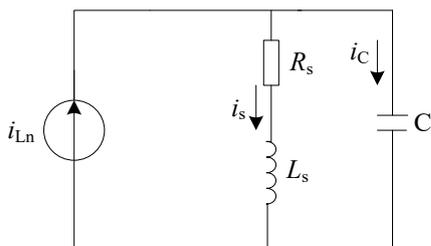


图 3-2 工厂电容器无功补偿系统并联谐振单相等效电路

图中， $i_{Ln}$  为负载等效谐波电流源。

参照图 3-2，根据相量法，获得电容支路和系统的电流方程分别为：

$$\dot{I}_s = \frac{-j \frac{1}{\omega C}}{R_s + j \left( \omega L_s - \frac{1}{\omega C} \right)} \times \dot{I}_{Ln} \quad (4)$$

$$\dot{I}_c = \frac{R_s + j \omega L_s}{R_s + j \left( \omega L_s - \frac{1}{\omega C} \right)} \times \dot{I}_{Ln} \quad (5)$$

当电路 2 发生并联谐振时，通过  $\text{Im}[Z(j\omega_0)]=0$ ，可解得系统固有频率为：

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} \sqrt{1 - \frac{C R_s^2}{L}} \quad (6)$$

通常实际工程由于  $R_s \ll \sqrt{\frac{L_s}{C}}$ ，存在  $\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$

因此，结合式 (4) 和式 (5)，谐振时电路谐波电流有效值为：

$$\frac{I_s}{I_{Ln}} = \frac{X_{Cn}}{R_s}$$

$$\frac{I_c}{I_{Ln}} = \sqrt{1 + \left( \frac{X_{Ln}}{R_s} \right)^2} \quad (7)$$

式中， $X_{Ln}$  和  $X_{Cn}$  分别为电路谐振感抗和容抗。由于  $R_s \ll X_{Ln}$ 、 $R_s \ll X_{Cn}$ ，因此，并

联谐振时，电容回路及系统电流将急剧放大。

### 3. 谐振抑制的基本原理

工程中为了抑制电容器谐波电流，通常采用串联适当参数电抗器的方法。

在谐波抑制中，串联感抗值的确定应使可能产生的任何谐波下，均使电容器回路的总电抗为感抗而不是容抗，从而消除了谐振的可能。串联电抗器的感抗值按下式计算：

$$X_{Lc} = K \times \frac{X_C}{n^2} \quad (8)$$

式中， $X_{Lc}$  为串联电抗器的工频感抗， $X_C$  为补偿电容器的工频容抗， $\Omega$ ； $n$  为可能产生的最低次谐波次数， $K$  为可靠系数，一般取 1.2~1.5。

对于三相桥不控整流电路，系统中包含 5、7、11 等次数谐波：

$$X_L = 1.2 \times \frac{X_C}{5^2} \approx 5\% X_C$$

对于电弧炉：

$$X_L = (12\% \sim 13\%) X_C$$

工程中，一般 4.5%~6% 的电抗率适合于抑制 5 次谐波，12% 的电抗率适合于抑制 3 次谐波。

需要注意的是，串联电抗器会使电容器的基波电压升高，其值为：

$$U_C = U_N \frac{X_C}{X_C - X_L} \quad (9)$$

$U_N$  为补偿回路母线额定电压。

对于 5 次谐波，电容器端电压可升高 6%，电容器的额定电压应高于系统电压，在电容器选型设计时应考虑该因素。

## 三、实验内容和步骤

### 电容器无功补偿系统串联谐振特性分析及谐振抑制实验

#### 1. 电源电压谐波设置

本实验设置电源电压存在畸变，模拟某工厂钢铁车间电源电压畸变情况。

设定电源电压包含 5、7、11、13 和 17 次谐波电压，具体参数见表 3-1。

表 3-1 电源电压  $n$  次谐波含有率  $HRU_n$

谐波次数	5	7	11	13	17
谐波含有率	5.0%	4%	3%	2%	0.8%

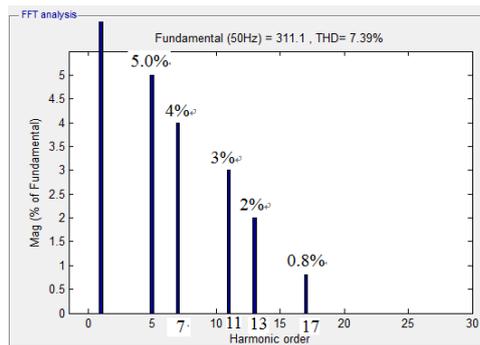
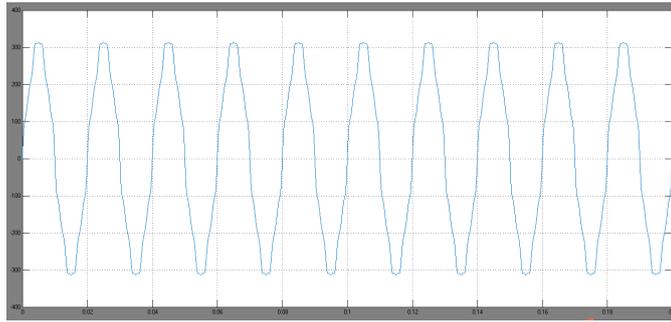


图 3-1 谐波电压源

## 2. 观测电容器无功补偿系统串联谐振特性

### (1) 无功补偿电容器的选型、安装与接线

从补偿电容器元件库中选择型号为 0.25-50-4Yn 的电容器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

### (2) 示波器连接。

### (3) 合闸补偿电容器柜开关。

(4) 观测系统串联谐振特征参数并记录数据，包括：电容器电压和电流的典型谐波分量有效值  $U_{Cn}$ 、 $I_{Cn}$ ， $n=1, 5, 7, 11, 13, 17$ 。

表 3-2 无功补偿系统串联谐振特征参数 (0.25-50-4Yn)

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						

### (5) 分闸补偿电容器柜开关。

(6) 从电容器元件库中任选另外一组型号的电容器(0.25-30-4Yn 或 0.25-20-4Yn)，

并重复实验步骤 (1)、(2)、(4)，数据录入表 3-3。

表 3-3 无功补偿系统串联谐振特征参数

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						

(7) 根据数据表 3-2 和 3-3，分析电容器无功补偿系统串联谐振特性。

### 3. 观测电容器无功补偿系统串联谐振抑制特性

#### (1) 无功补偿电容器的选型、安装与接线

从电容器元件库中选择型号为 0.25-50-4Yn 的一组电容器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

#### (2) 串联电抗器的选型、安装与接线

从串联电抗器元件库中 CK-0.4-4.5 和 CK-0.4-6 两种型号的电抗器中，任选一种型号的串联电抗器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

#### (3) 合闸补偿电容器柜开关。

#### (4) 观测系统串联谐振抑制特征参数并记录数据。

表 3-4 系统串联谐振抑制特征参数 (0.25-50-4Yn)

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						

#### (5) 分闸补偿电容器柜开关。

#### (6) 根据数据表 3-2 和表 3-4，分析电容器无功补偿系统串联谐振抑制特性。

## 电容器无功补偿系统并联谐振特性分析及谐振抑制实验

### 1. 负载谐波电流设置

本实验设置谐波负载为电压型三相不控整流器负载，设置基波电流为 100A。设注入电网的谐波电流次数及谐波含量参照表 3-5：

表 3-5 三相不控整流器负载的谐波电流次数及其含有率  $HRI$

谐波次数	1	5	7	11	13	17
HRI (%)	100	20	14	9.1	7.7	5.9

## 2. 观测电容器无功补偿系统并联谐振特性

### (1) 无功补偿电容器的选型、安装与接线

从补偿电容器元件库中选择型号 0.25-50-4Yn 的一组电容器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

### (2) 合闸补偿电容器柜开关。

### (3) 连接示波器。

(4) 观测系统串联谐振特征参数并记录数据，包括：电容器电压和电流的典型谐波分量有效值  $U_{Cn}$ 、 $I_{Cn}$ ，系统电流典型谐波分量有效值  $I_{sn}$ 。

表 3-6 系统并联谐振特征参数 (0.25-50-4Yn)

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						
$I_{sn}$						

### (5) 分闸补偿电容器柜开关。

(6) 从电容器元件库中任选另外一组型号的电容器(0.25-30-4Yn 或 0.25-20-4Yn)，并重复实验步骤 (1)、(2)、(4)，数据录入表 3-7。

表 3-7 系统并联谐振特征参数 (电容器型号 2)

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						
$I_{sn}$						

(7) 根据数据表 3-6 和表 3-7，分析电容器无功补偿系统并联谐振特性。

## 3. 观测电容器无功补偿系统并联谐振抑制特性

### (1) 无功补偿电容器的选型、安装与接线。

从电容器元件库中选择型号为 0.25-50-4Yn 的一组电容器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

### (2) 串联电抗器的选型、安装与接线

从串联电抗器元件库中 CK-0.4-4.5 和 CK-0.4-6 两种型号的电抗器中，任选一种型号的串联电抗器，安装到电容器柜中合适位置并接线。

(3) 合闸补偿电容器柜开关。

(4) 观测系统串联谐振抑制特征参数并记录数据。

表 3-8 系统并联谐振抑制特征参数 (0.25-50-4Yn)

谐波次数	1	5	7	11	13	17
$U_{Cn}$						
$I_{Cn}$						
$I_{sn}$						

(5) 分闸补偿电容器柜开关。

(6) 根据数据表 3-6 和表 3-8，分析电容器无功补偿系统并联谐振抑制特性。

#### 四、思考题

1. 试分析所选电容器型号下各次谐波的分布特性，例如：各次谐波偏离谐振点的距离与含量的关系等。
2. 试分析不同电容器选型条件下，各次谐波含量的变化规律，可举例分析原因，说明电容器容量选型对无功补偿工程应用的指导意义。
3. 分析串联电抗器后，谐波电压和电流总畸变率以及各次谐波分布的变化情况，说明原因。

#### 五、实验报告

1. 归纳总结本实验结论。
2. 实验过程总结，比如实验中遇到了哪些困难，如何解决，有哪些需要特别注意的事项，实验收获等。