

第六章 微机保护与综合自动化

6.1 微机保护基本原理

6.1.1 微机保护的特点及发展

➤ 微机保护主要特点

- ◆ 改善、提高保护性能，动作正确率高
- ◆ 易于获得附加功能
- ◆ 维护调试工作量小
- ◆ 可靠性高
- ◆ 硬件标准化设计
- ◆ 使用灵活方便，人机界面友好
- ◆ 可以进行远方监控

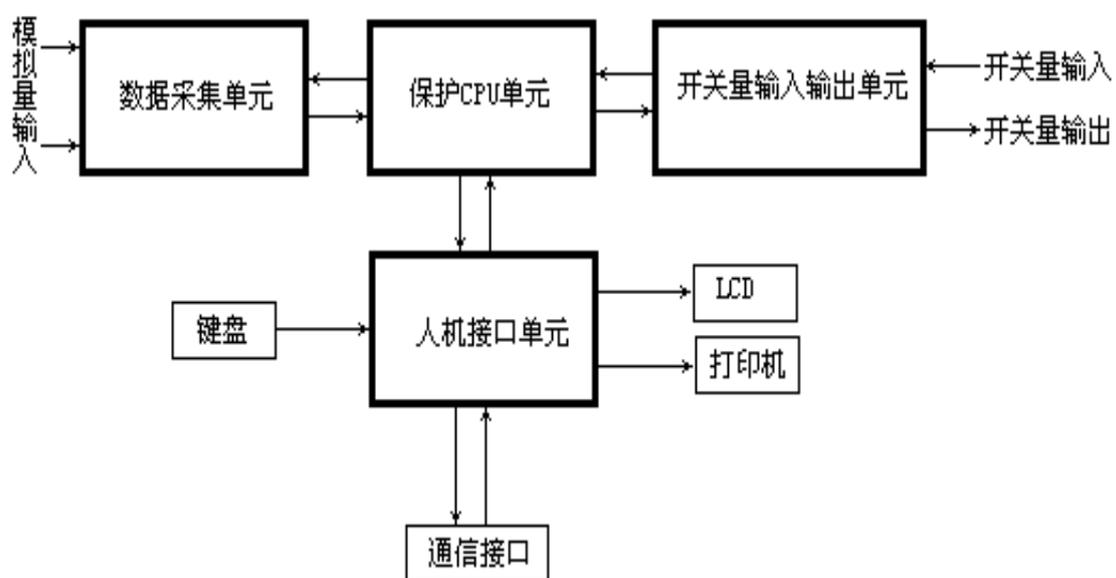


➤ 继电保护新技术

- ✓ 自适应控制技术
- ✓ 人工神经网络与小波
 - ◆ 故障类型的判别
 - ◆ 故障测距
 - ◆ 方向保护
 - ◆ 主设备保护
- ✓ 智能化检测与自动测试
 - ◆ 数字化测试手段
 - ◆ 动作行为分析的透明化



6.1.2 微机保护硬件构成



微机保护装置硬件原理示意图



➤ 数据采集单元

✓ 电压形成回路

✓ 模拟量滤波回路

✓ 模数转换回路

◆ 基于逐次逼近原理的模数转换器件 (AD)

◆ 基于电压-频率转换的模数转换器件 (VFC)

两种模数转换器件的特点如下:

◆ 输出数据格式 (AD: 二进制编码, 可直接进行数字运算;

VFC: 脉冲个数, 需要将相邻两次计数值相减后才能进行数字运算)

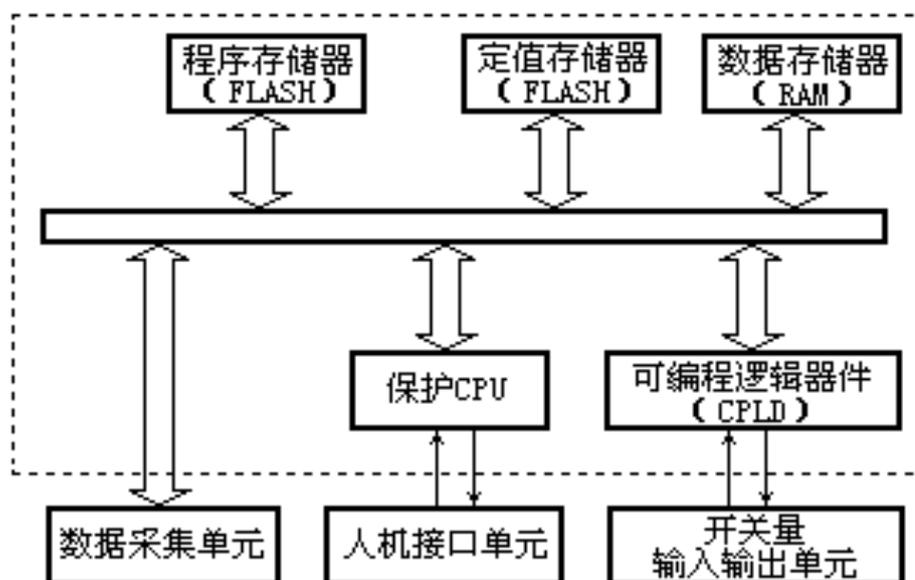
◆ 分辨率 (AD: A/D芯片的位数; VFC: VFC芯片的最高转换频率和采样间隔)

◆ 抗干扰性 (AD: 不便于实现光电隔离, 抗干扰能力较差;

VFC: 便于实现模拟系统与数字系统之间的隔离, 抗干扰能力强)



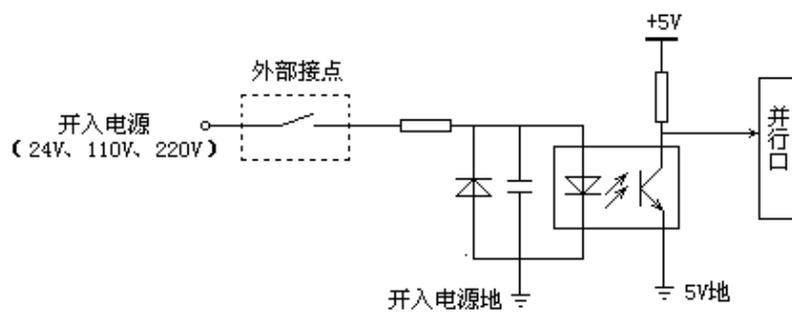
➤保护CPU单元



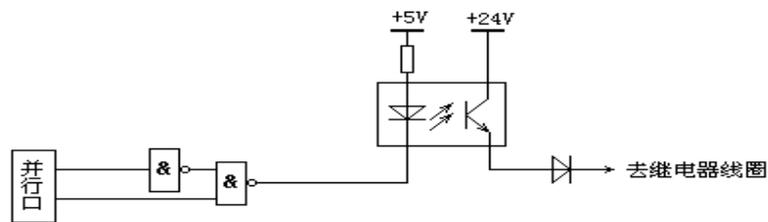
保护CPU单元原理框图



► 开关量输入/输出单元

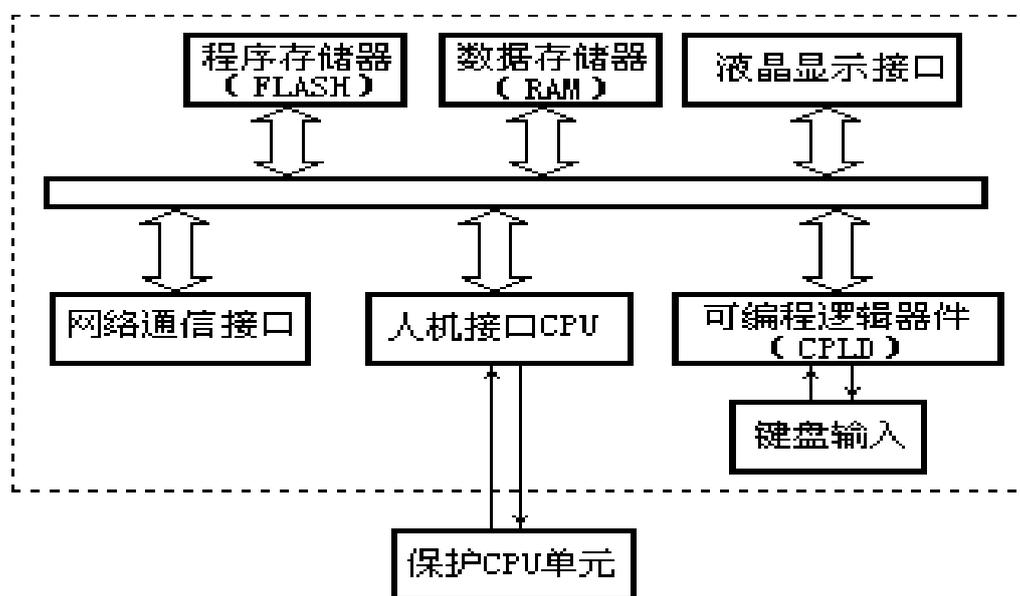


开关量输入电路原理图



开关量输出电路原理图

➤ 人机接口与通信CPU单元



人机接口单元原理框图



►对微机保护硬件的要求

- ◆高可靠性
- ◆开放性
- ◆通用性
- ◆灵活性和可扩展性
- ◆模块化与智能化状态检测



6.1.3 微机保护算法

即**数学模型**，不同算法可实现各种保护的功能。

模拟式保护的特性和功能完全由装置（**硬件**）决定，而微机保护的硬件是共同的，保护的特性与功能主要由**软件**决定。

算法的**核心**是算出可表征被保护对象运行特点的物理量，如电压、电流有效值和相位等，序分量，基波分量等。用这些基本电气量的计算值，构成各种不同原理的保护。

算法分**基本算法**和**继电器算法**。前者是计算被测电气量的大小和相位的方法，它们是微机保护的基础；后者是根据继电器的动作特性拟定的算法，也称动作特性算法。

评价算法优劣的**标准**：算法的精度和运算速度。速度包括：算法要求的采样点数（数据窗长度），算法运算工作量。研究算法实质是在速度和精度上进行权衡。

全波傅立叶算法是应用最广泛、并能满足精度要求的一种，以傅立叶级数为基础，适用任何周期函数的输入信号。

西南交通大学



电流 $i(t)$ 、电压 $u(t)$ 输入模拟信号，都可按傅氏级数表达为含有直流分量 I_0 、 U_0 和各种谐波分量 I_n 、 U_n 的形式，如 $i(t)$ 为：

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nC} \cos(n\omega_1 t) + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nS} \sin(n\omega_1 t)$$

I_{nC} 和 I_{nS} 分别为 n 次谐波的余弦和正弦分量电流； ω_1 为基频电流角频率。

利用正、余弦正交函数集的相应正交函数作样本函数，与上式相关，如获取基波分量电流时，用 $\sin \omega_1 t$ 、 $\cos \omega_1 t$ 作样本分别与上式 $i(t)$ 相乘，并取一周期 T 积分，由正交函数特性得到消去 I_0 和各次谐波分量的 I_{1C} 和 I_{1S} 表达式，为

$$I_{1S} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cdot \sin \omega_1 t dt$$



$$I_{1C} = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) \cdot \cos w_1 t dt$$

设每工频周期采样N次，对上式用梯形法数值积分来代替，则得

$$I_{1S} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \sin k \frac{T}{N}$$

$$I_{1C} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \cos k \frac{T}{N}$$

k 、 i_k 分别为第 k 次采样及其电流采样值。

I_{1C} 和 I_{1S} 意义为一周期 (T) 中 i_k 采样值余弦和正弦分量的加权平均值。同理求出 U_{1C} 和 U_{1S} 分量，则基波电流、电压和复数形式和功率因数角分别为



$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1C} - j\dot{U}_{1S}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1C} - j\dot{I}_{1S}$$

$$U_1 = \sqrt{U_{1S}^2 + U_{1C}^2}$$

$$R = \frac{U_{1C} \cdot I_{1C} + U_{1S} \cdot I_{1S}}{I_{1C}^2 + I_{1S}^2}$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1S}^2 + I_{1C}^2}$$

$$X = \frac{U_{1C} \cdot I_{1S} - U_{1S} \cdot I_{1C}}{I_{1C}^2 + I_{1S}^2}$$

$$\varphi = \arctg \frac{R}{X} = \arctg \frac{U_{1C} \cdot I_{1C} + U_{1S} \cdot I_{1S}}{U_{1C} \cdot I_{1S} - U_{1S} \cdot I_{1C}}$$

$$I_{nS} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \sin nk \frac{T}{N}$$

$$I_{nC} = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \cos nk \frac{T}{N}$$

需要指出，暂态的衰减直流分量将对傅氏算法基波和谐波分量计算结果产生较大误差，应采用数字滤波进行补偿。



6.1.4 提高微机保护可靠性的措施

① 抗干扰措施

(1) 隔离与屏蔽措施

◆ 光电隔离

◆ 变压器隔离

◆ 继电器隔离

(2) 滤波与去耦

◆ 数据采集单元中的模拟低通滤波器

◆ 集成电路芯片旁的去耦电路

◆ 电源入口处的抗干扰电容

(3) 硬件自复位电路



(4)硬件冗余设计

- ◆完全双重化的保护配置
- ◆装置内部实现部分插件的双重化或热备用
- ◆部分元件采用表决方案

(5)出口跳闸回路闭锁

- ◆双线驱动命令编码方式
- ◆出口电源受告警继电器和启动元件控制

②自动检测

- ◆存储器自检
- ◆程序和定值自检
- ◆数据采集单元自检
- ◆开关量输入通道自检
- ◆开关量输出回路自检



6.2 综合自动化系统的功能及构成

6.2.1 综合自动化系统的发展概况

① 发展概况

(1) 分立元件的自动化装置阶段

- ◆ 20世纪70年代以前；
- ◆ 主要采用模拟电路，由晶体管等分立元件组成；
- ◆ 各装置独立运行，互不相干；
- ◆ 缺乏智能性，没有故障自诊断能力。

(2) 智能自动装置阶段

- ◆ 微机保护装置、微机远动装置；
- ◆ 具有故障自诊断能力；
- ◆ 独立运行，不能资源共享。



(3) 综合自动化系统阶段

➤ 国外发展概况

◆ 始于20世纪70年代

日本的SDCS-1系统

西门子的LSA678系统

ABB的SCS100系统（中低压）、SCS200系统（高压）

◆ 最新进展（基于IEC61850）

ABB的MicroSCADA Pro变电站自动化系统（SYS600）

间隔层：IED670系列智能化微机保护及控制装置

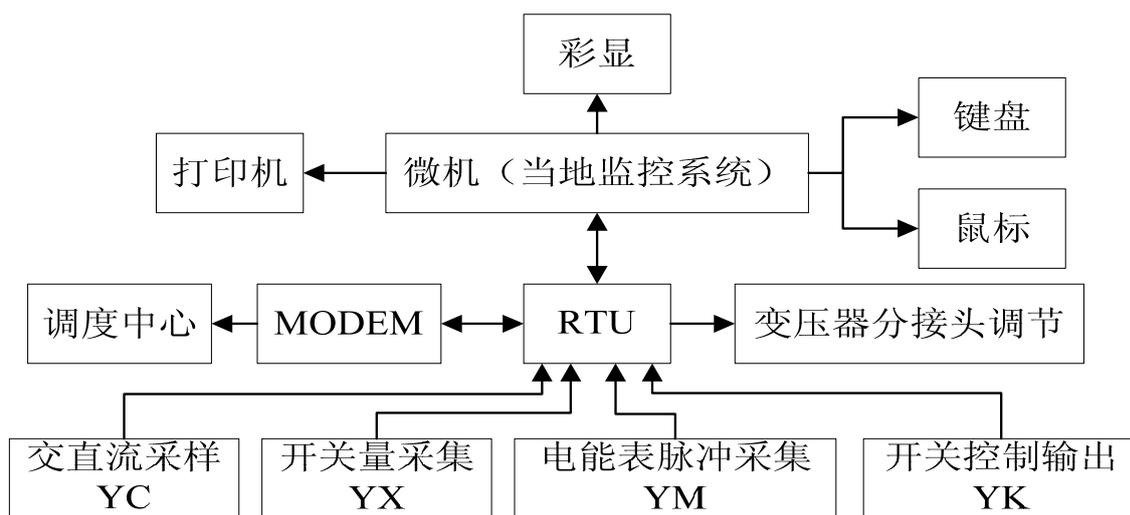
西门子的SICAM PAS系统

间隔层：SIPROTEC系列间隔控制单元

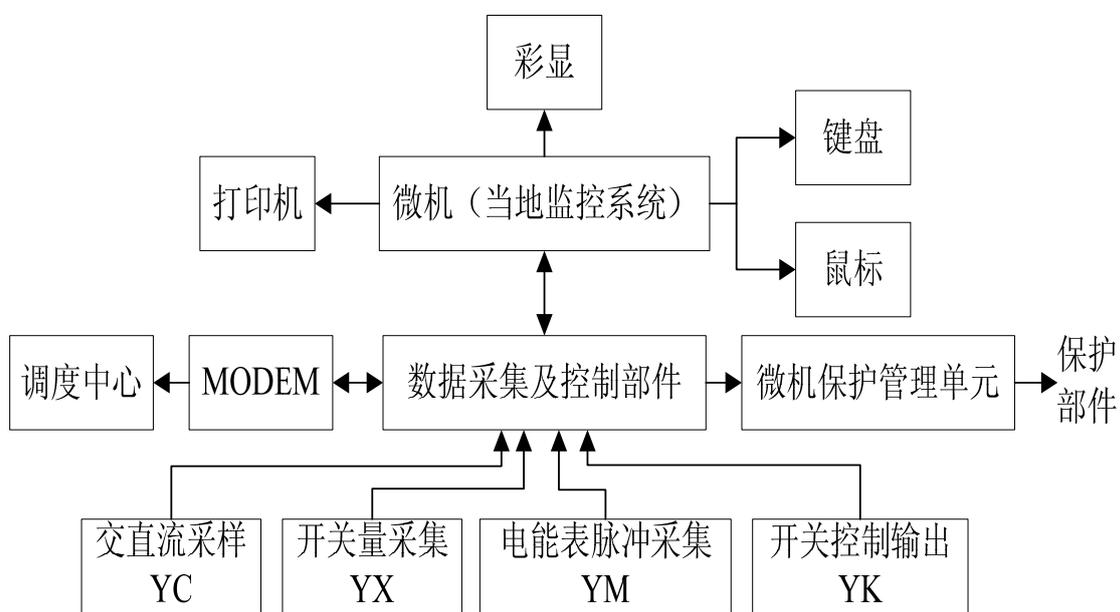


国内发展概况

◆以RTU为基础的变电站自动化系统



◆集中式变电站自动化系统



②传统系统的缺陷

组成：继电保护+RTU的模式

- ◆安全性、可靠性不高
- ◆占地面积大，增加了投资
- ◆维护工作量大，设备可靠性差

③发展方向

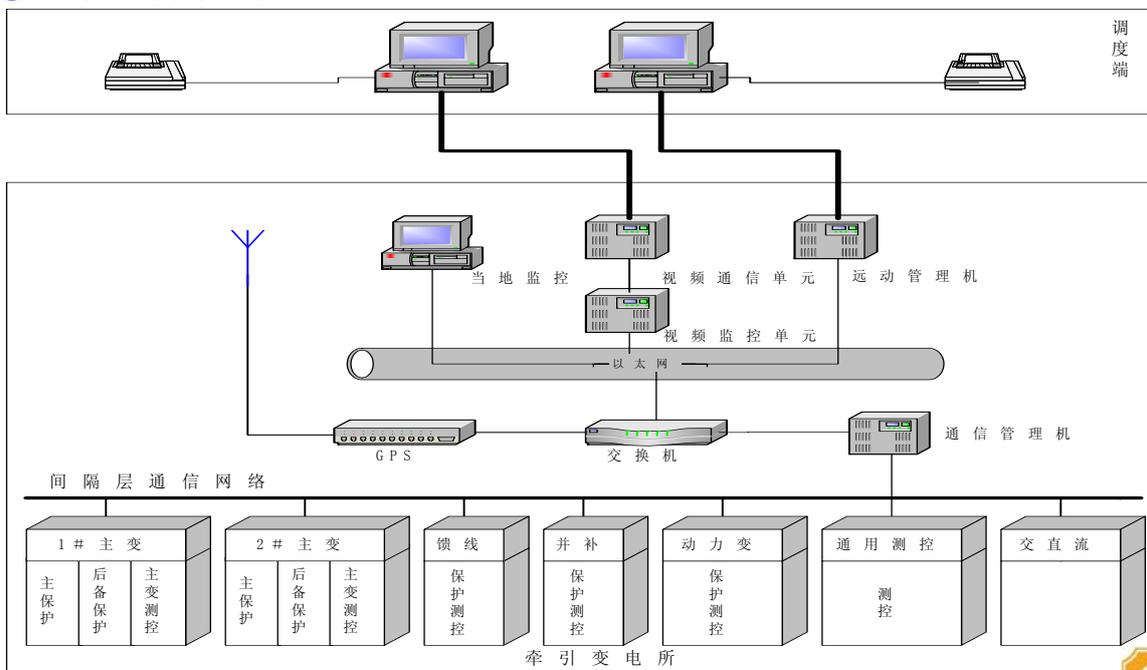
全数字化综合自动化系统的主要特点：

- ◆智能化的一次设备
- ◆网络化的二次设备
- ◆自动化的运行管理系统



6.2.2 综合自动化系统的构成

① 系统构成



西南交通大学



(1)变电所层

- 当地监控单元
 - ◆ 当地监控功能
 - ◆ 系统维护功能
 - ◆ 实时及报表打印功能
- 远动通信单元

(2)间隔层

- 牵引主变压器单元
 - ◆ 保护功能
 - ◆ 测量功能
 - ◆ 控制功能



- ◆故障录波和负荷录波功能
- ◆备用电源自投功能

➤馈线单元

- ◆保护功能
- ◆测量功能
- ◆控制功能
- ◆故障录波和负荷录波功能
- ◆故障测距功能

➤并补单元

- ◆保护功能
- ◆测量功能
- ◆控制功能
- ◆故障录波和负荷录波功能



②综合自动化系统的特点

- ◆功能综合化
- ◆分层分布化结构
- ◆操作监视屏幕化
- ◆运行管理智能化
- ◆通信手段多元化
- ◆测量显示数字化



③综合自动化系统的优点

与传统的微机保护+RTU自动化系统相比，综合自动化系统具有如下优点：

- ◆提高牵引变电所的安全、可靠运行水平
- ◆提高牵引供电系统的运行管理水平
- ◆降低造价，减少总投资
- ◆促进无人值班变电所管理模式的实行



6.2.3 综合自动化系统的主要功能

① 监控子系统

- ◆ 数据采集功能
- ◆ 事件顺序记录功能
- ◆ 故障记录、故障录波和测距功能
- ◆ 操作控制功能
- ◆ 安全监视功能

② 继电保护子系统

- ◆ 故障记录功能
- ◆ 统一时钟对时功能
- ◆ 存储多套整定值
- ◆ 当地、远方修改整定值
- ◆ 故障自诊断、自闭锁和自恢复功能

③ 通信子系统

- ◆ 所内通信功能
- ◆ 与调度端通信功能



6.2.4 综合自动化系统的应用模式

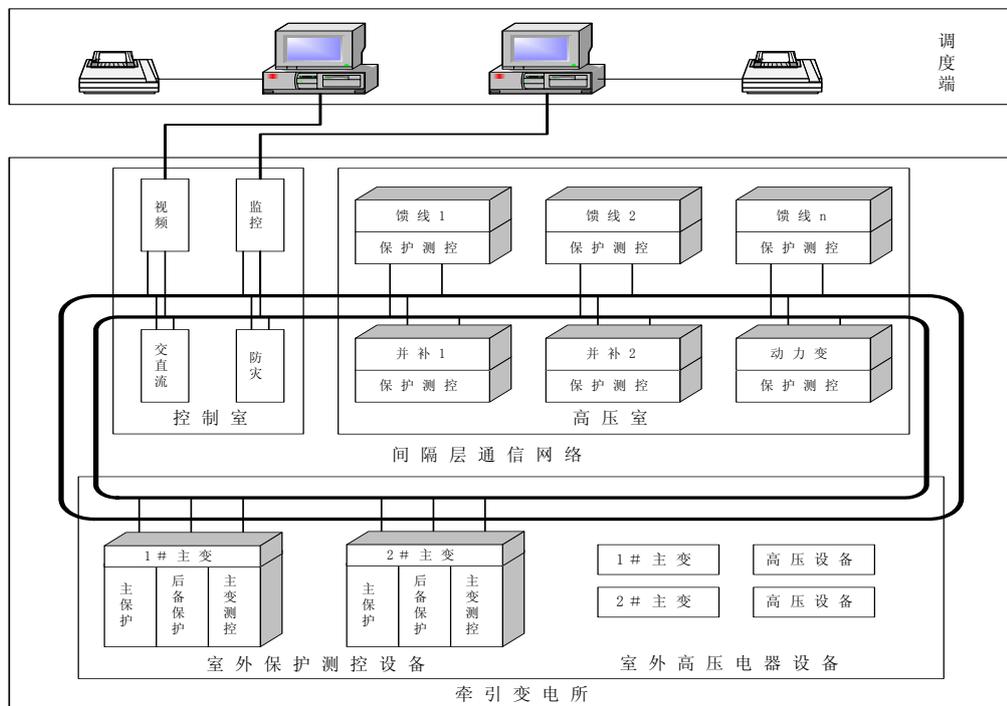
①分散式
无人值守
模式

◆视频监
控单元

◆自动灭
火单元

◆分散式
保护测控
单元

◆当地监
控单元



分散式无人值守综合自动化系统配置图

西南交通大学



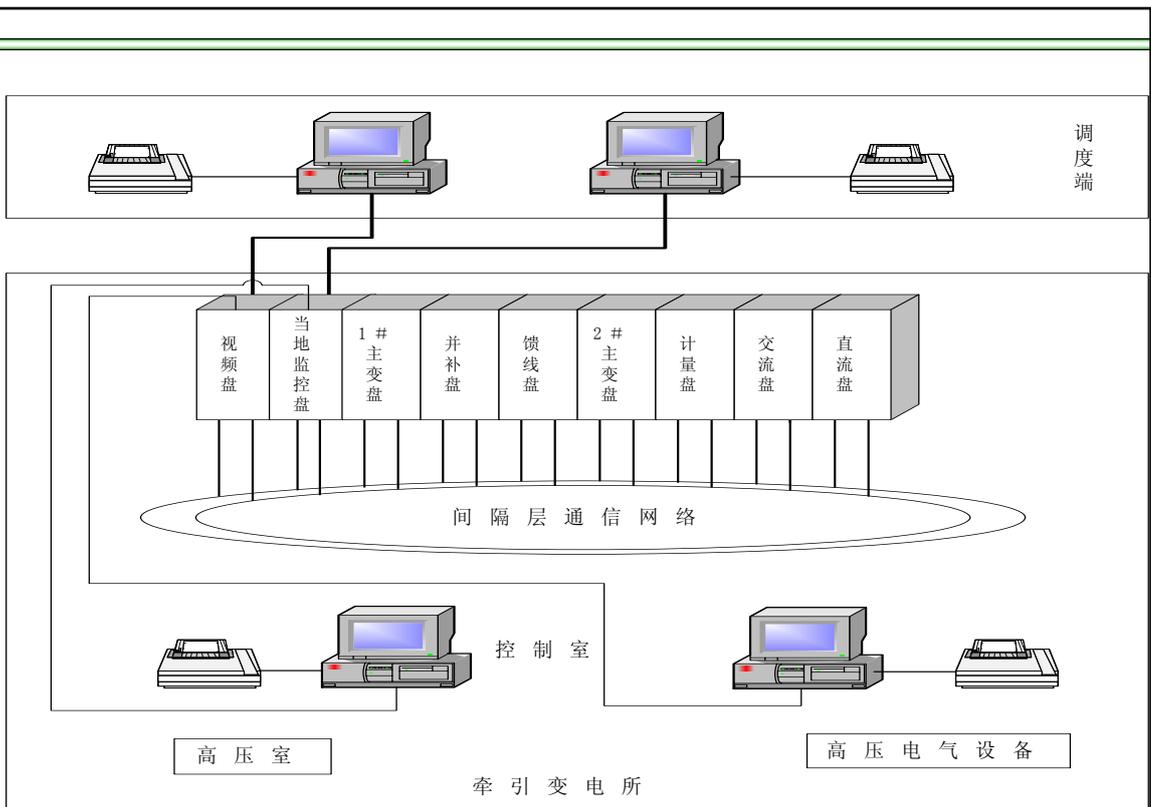
②集中
式有人
值班模
式

◆集中
式保护
测控单
元

◆当地
监控单
元

◆中央
信号

◆显示
表计



集中式有人值守综合自动化系统配置图

西南交通大学



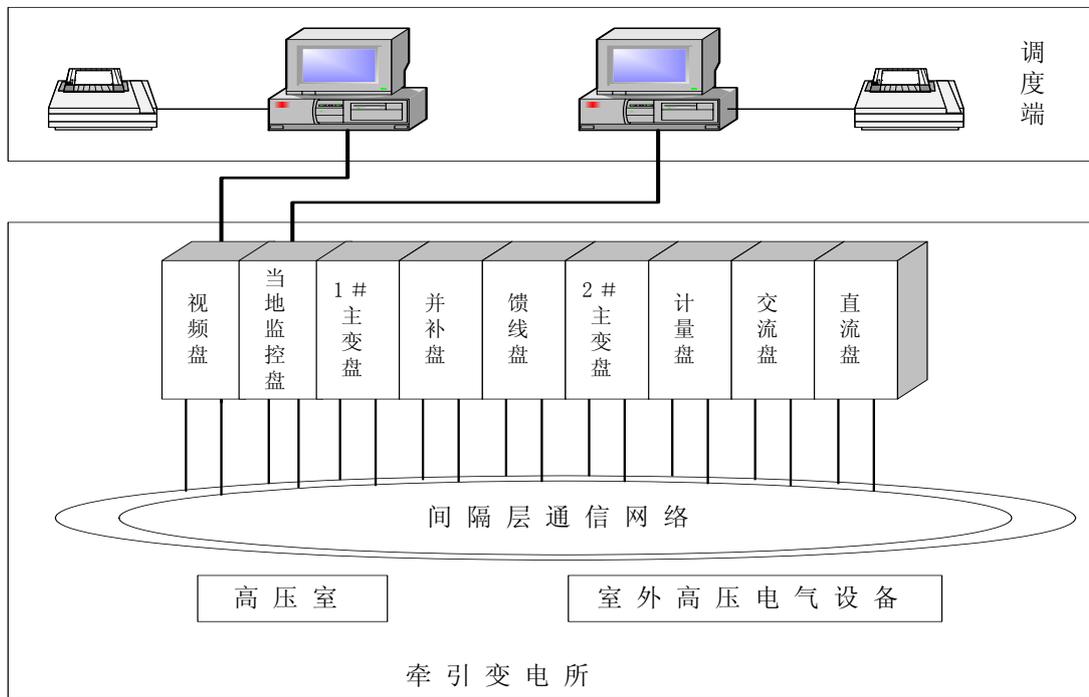
③集中式
无人值守
模式

◆视频监控
单元

◆自动灭
火单元

◆集中式
保护测控
单元

◆当地监
控单元



集中式无人值守综合自动化系统配置图

西南交通大学



➤整定计算实例

(1)系统参数

①电力系统参数

系统容量 $S_j = 100\text{MVA}$, $X_{C\max}^* = 0.3129$, $X_{C\min}^* = 0.3193$
 $U_j = 115\text{kV}$

②牵引主变压器参数

Y/ Δ -11变压器

变压器容量 $S_e = 20\text{MVA}$

短路电抗 $U_d\% = 10.62\%$

高压侧CT变比 $n_{CT1} = 40$

低压侧CT变比 $n_{CT2} = 150$

零序CT变比 $n_{CT0} = 20$



⑥ 低压启动

$$U_{DZ} = \frac{0.6U_e}{n_{PT}} = \frac{0.6 \times 27500}{275} = 60V$$

⑦ 高压侧过电流

$$I_{DZ} = \frac{K_K \times I_E}{K_f \times n_{CT1}} = \frac{1.2 \times 104.97}{0.95 \times 40} = 3.31A$$

$$K_m = \frac{I_{d\min}^{(2)}}{n_{CT1} \times I_{DZ}} = \frac{511.30}{40 \times 3.31} = 3.86 > 1.2$$

时限: $T=1.2s$



6.2 综合自动化系统的功能及构成

6.2.1 综合自动化系统的发展概况

① 发展概况

(1) 分立元件的自动化装置阶段

- ◆ 20世纪70年代以前；
- ◆ 主要采用模拟电路，由晶体管等分立元件组成；
- ◆ 各装置独立运行，互不相干；
- ◆ 缺乏智能性，没有故障自诊断能力。

(2) 智能自动装置阶段

- ◆ 微机保护装置、微机远动装置；
- ◆ 具有故障自诊断能力；
- ◆ 独立运行，不能资源共享。



c) 根据公式 $U_{CD} = \frac{\Delta U}{K_k} \times \frac{1}{n_{PT}}$ 计算差电压整定值

$$U_{CD} = \frac{\Delta U}{K_k} \times \frac{1}{n_{PT}} = \frac{6111.11}{1.5} \times \frac{1}{275} = 14.8V$$

时限: $T=0.5s$



(2) 变压器保护整定计算

① 变压器额定电流

高压侧额定电流：

$$I_E = \frac{S_e}{\sqrt{3} \times 110} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 110} = 104.97 \text{ A}$$

低压侧额定电流：

$$I_e = \frac{3}{\sqrt{7}} \times I_E \times \frac{4}{\sqrt{3}} = \frac{3}{\sqrt{7}} \times 104.97 \times \frac{4}{\sqrt{3}} = 274.88 \text{ A}$$

对于Yn, d11接线牵引变压器

$$I_\alpha = I_\beta = K_B \frac{3}{\sqrt{7}} I_E$$

西南交通大学



②短路电流

$$\text{变压器短路电抗: } X_{T^*} = \frac{U_d \%}{100} \times \frac{S_j}{S_e} = \frac{10.62}{100} \times \frac{100}{20} = 0.531$$

最大运行方式下的短路电流为:

$$I_{d \max}^{(3)} = \frac{1}{X_{C \max^*} + X_{T^*}} \times \frac{S_j}{\sqrt{3} \times U_j} = \frac{1}{0.3129 + 0.531} \times \frac{100000}{\sqrt{3} \times 115} = 594.92 \text{ A}$$

最小运行方式下的短路电流为:

$$I_{d \min}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1}{X_{C \min^*} + X_{T^*}} \times \frac{S_j}{\sqrt{3} \times U_j} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{1}{0.3193 + 0.531} \times \frac{100000}{\sqrt{3} \times 115} = 511.30 \text{ A}$$



⑦低电压保护

$$U_{DZ} = 0.6U_e = 60V$$

时限：T=0.5s

⑧过电压保护

$$\begin{aligned} U_{DZ} &= K \cdot \frac{X_C - X_L}{X_C} \cdot U_{Cn} \cdot \frac{1}{n_{PT}} \\ &= 1.05 \times 0.875 \times \frac{42000}{275} = 140 V \end{aligned}$$

时限：T=5s



⑧低压侧过电流

$$I_{DZ} = \frac{K_K \times I_e}{K_f \times n_{CT2}} = \frac{1.2 \times 274.88}{0.95 \times 150} = 2.31 \text{A}$$

$$K_m = \frac{115}{27.5} \times \frac{I_{d \min}^{(2)}}{n_{CT2} \times I_{DZ}} = \frac{115}{27.5} \times \frac{511.30}{150 \times 2.31} = 6.17 > 1.2$$

时限：T=0.9s

⑨零序过电流

$$I_{dz} = \frac{K_K \times I_E}{K_f \times n_{CT0}} \times 70\% = \frac{1.2 \times 104.97}{0.95 \times 20} \times 0.70 = 4.64 \text{A}$$

时限：T=3.5s



③ 电流速断保护

$$I_{SD} = K \times I_{y\max} \times \frac{1}{n_{CT1}} = 1.2 \times 309.37 \times \frac{1}{40} = 9.28A$$

④ 过电流保护

$$I_{DZ} = K \times \frac{I_e}{n_{CT1} K_{fh}} = 1.2 \times \frac{57.14}{40 \times 0.95} = 1.8A$$

时限：T=5s



(3) 馈线保护整定计算

① 电流速断保护

$$I_{zd} = K_k \times I_{Fmax} \times \frac{1}{n_{CT}} = 1.2 \times 610 \times \frac{1}{150} = 4.88A$$

时限：T=0.1s

② 阻抗 I 段保护

$$X_{ZD} = K_k \times L \times X_0 \times \frac{n_{CT}}{n_{PT}} = 1.5 \times 26.08 \times 0.565 \times \frac{150}{275} = 12.06\Omega$$

$$R_{ZD} = \frac{0.9U_e}{K_k \times I_{Fmax}} \left(\cos\varphi_F - \frac{\sin\varphi_F}{\text{tg}\varphi_L} \right) \times \frac{n_{CT}}{n_{PT}} = \frac{0.9 \times 27500}{1.1 \times 610} \times \left(\cos 37^\circ - \frac{\sin 37^\circ}{\text{tg} 65^\circ} \right) \times \frac{150}{275}$$

$$= 10.42\Omega$$

时限：T=0.1s



③平衡系数整定

$$K_{ph} = k \times \frac{n_{CT1}}{n_{CT2}} = \frac{4}{\sqrt{3}} \times \frac{40}{150} = 0.616$$

④差动速断保护

$$I_{SD} = 7I_E \times K_{jx} \times \frac{1}{n_{CT1}} = 7 \times 104.97 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{40} = 31.82 \text{ A}$$

⑤比率差动保护

◆差动电流

$$I_{DZ} = 0.5I_E \times K_{jx} \times \frac{1}{n_{CT1}} = 0.5 \times 104.97 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{40} = 2.27 \text{ A}$$



⑩一般反时限过负荷

$$I_{dz} = \frac{K_K}{K_f \times n_{CT1}} \times I_{E(A, C)} = \frac{1.09}{0.95 \times 40} \times 104.97 = 3.01A$$

时间常数: $t=1.23s$



③ 电流增量保护

$$\Delta I_{zd} = K_k \times \Delta I_{F \max} \times \frac{1}{n_{CT}} = 1.2 \times 250 \times \frac{1}{150} = 2A$$

时限：T=0.1s



(4) 并补保护整定计算

① 电容器组额定电流和容抗

$$I_e = \frac{Q_e}{U_e} = \frac{2400}{42} = 57.14A$$

$$X_C = \frac{U_e^2}{Q_e} = \frac{42000^2}{2400 \times 10^3} = 735\Omega$$

② 并补合闸涌流

$$X_L = 0.125X_C = 0.125 \times 735 = 91.875\Omega$$

$$I_{y\max} = \sqrt{2}I_e \times \left(1 + \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}\right) = \sqrt{2} \times 57.14 \times \left(1 + \sqrt{\frac{735}{91.875}}\right) = 309.37A$$



⑤谐波过电流保护

$$I_{XB} = \sqrt{(1.3I_e)^2 - \left(\frac{27500}{X_C - X_L}\right)^2} \times \frac{1}{n_{CT}} = \sqrt{(1.3 \times 5714)^2 - \left(\frac{27500}{735-91875}\right)^2} \times \frac{1}{40} = 1.52A$$

时限：T=120s

⑥差电流保护

$$I_{CD} = K \times k_{tx} \times \Delta f_{\max} \times I_{y\max} \times \frac{1}{n_{CT2}} = 1.25 \times 1 \times 0.1 \times 30937 \times \frac{1}{30} = 1.29A$$

时限：T=0.5s



⑨差电压保护

a) 根据公式 $\frac{MU_{\max}}{N(M - K)(1 - D) + K} \geq 1.1U_{Cn}$
计算K

$$\frac{6 \times 27500}{4 \times (6 - K)(1 - 0.125) + K} \geq 1.1 \times 10500$$

求出 $K \geq 2.69$ ，取 $K=3$ 。

b) 根据公式 $\Delta U = \frac{K}{N(M - K)(1 - D) + K} U_{\max}$
计算差电压为

$$\Delta U = \frac{3}{4(6 - 3)(1 - 0.125) + 3} \times 27500 = 6111.11V$$



③接触网参数

采用单线单边供电方式

最大负荷电流 $I_{F \max} = 610\text{A}$

接触网单位阻抗 $Z_0 = 0.263 + j0.565 \Omega / \text{km}$

供电臂长度 $L = 26.08\text{km}$

CT变比 $n_{CT} = 150$

④并补装置参数

电容组为6并4串

额定容量 $Q_e = 2400\text{kVar}$

额定电压 $U_e = 42\text{kV}$

过流CT变比 $n_{CT1} = 40$ ，差流CT变比 $n_{CT2} = 30$



◆ 制动电流 I 段

$$I_1 = I_E \times K_{jx} \times \frac{1}{n_{CT1}} = 104.97 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{40} = 4.55 \text{ A}$$

◆ 制动电流 II 段

$$I_2 = 3I_E \times K_{jx} \times \frac{1}{n_{CT1}} = 3 \times 104.97 \times \sqrt{3} \times \frac{1}{40} = 13.65 \text{ A}$$

◆ I 段比率

$$K_1 = 0.3$$

◆ II 段比率

$$K_2 = 0.5$$



衷心感谢！

谢谢各位同学的诚意合作！

谢谢郭蕾老师的辛勤工作！

西南交通大学

