

[自动复核]

泵站电气设备的自动复核计算系统研发

文/刘虹 林中杰
上海勘测设计研究院有限公司

依据水利水闸泵站电气设备复核计算的方法和原理，研发一套电气设备复核计算软件系统。该软件基于Pyqt5的图形用户界面架构，界面友好。利用泵站典型电气主接线，实现变压器容量校验、电气设备的分断能力检验、动稳定和热稳定校验，以及电动机起动电压复核和电力电缆的截面积复核。

泵站是我国水利基础设施的重要组成部分，在排涝、防洪等方面均具有十分重要的作用。为加强泵站的安全运行管理，需要定期安全鉴定，即对泵站结构进行安全检查、电气设备的分断能力和动热稳定性、电动机起动时母线电压以及主变压器的容量复核。

变电站电气设备复核计算过程复杂，计算量庞大。目前国内外电力系统常用分析软件虽然可以完成部分项目的复核计算，但是，这些软件是通用电力系统的分析计算，软件引进成本高、建模复杂，不适合泵站电气设备复核计算。上海勘测设计研究院有限公司根据泵站的特点，利用基于Pyqt5的图形用户界面架构，研发一套自动、高效率的计算软件，能快速计算三相短路电流、变压器容量、母线压降、电动机起动压降、断路器开断电流、关合电流和电力电缆载流量等电气参数。

泵站电气设备自动复核计算软件（PERS）介绍

1. 软件架构设计

随着水利工程智能化需求的提升，泵站电气设

备复核计算软件成为工程安全与能效管理的关键技术支持。泵站电气设备复核计算软件通过集成多维度数据分析与规范计算算法，显著提升了设备复核的精准性和效率，软件架构如图1所示。

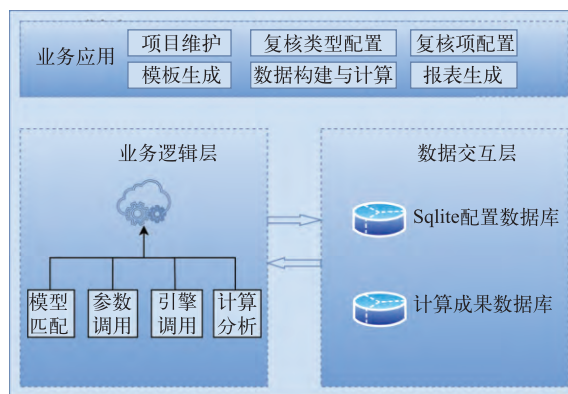


图1 复核计算系统架构图

软件以Pyqt5图形化界面框架为基础，Sqlite作为交换数据库进行系统集成开发。按模块化设计原则，系统分为业务应用模块、业务逻辑处理模块和数据交换模块三个模块。

业务应用层是面向用户，进行功能交互操作的层级，软件提供可视化的交互界面，支持用户进行

基础数据的配置，提供实时的数据录入与动态数据展示分析功能。自动生成多格式的计算成果报表，方便用户进行成果数据分析。

业务逻辑层是业务应用层用户操作指令下达后，系统进行的核心逻辑处理计算模块。业务逻辑层根据计算模块的指令，匹配对应的算法模型，调用用户层的入参，封装数据为标准原始数据结构体，将数据包送入引擎中进行数据的计算与分析。模型调用结束后，引擎将计算结果分发为结果数据包，返回给用户层进行可视化和后续操作。

数据交换层以数据底板为基础，一方面存储用户输入的各类配置数据与原始计算数据，数据以Sqlite数据库为容器进行存储。另一方面，数据引擎调用Sqlite数据，结合算法运算，将计算结果实时归一化入库管理。软件将数据模块独立部署，支持多用户间进行数据快速交换和传递。

2. 软件功能设计

软件以分布式功能分区为设计原则，按功能板块分为基础配置模块与计算复核板块，其中计算模块按复核类型，分为表单式和矩阵式类型。

基础配置模块：包含项目配置、复核类型和复核项配置三个功能。其中项目配置模块是管理承接的市场化项目合同信息，是软件数据的基础，所有的数据交互以项目为维度开展。复核类型配置是算法引擎的调用基础，根据电气规范复核计算要求和前序总结的负荷类型，根据不同的复核类型，调用差异化的计算引擎。复核项配置是根据实际项目电气设备网络图构建的复核单位。

表单式复核计算模块：主要用于用电负荷计算，开展数据模型的搭建。该模块共分为三个功能板块，分别为基础配置信息选择模块、计算表单构建模块和成果导出分析模块。其中计算表单构建模块用于实现计算引擎的生成操作、数据栅格的添加和计算的触发功能；成果导出分析模块用于成果的导出、数据分析以及引擎的重构。

矩阵式复核计算模块：主要用于短路电流、启动压降以及载流量的计算。该模块根据对应的计算类型，生成差异化的数据录入矩阵，用户根据具体计算入参，录入原始数据。数据计算引擎根据入参，进行指标的单步单点计算，按计算流程，做到一组参数一次计算，生成一组成果指标。

3. 运行环境

软件基于Pyinstaller继承构建，支持跨平台运行，包括了Windows、Linux以及macOS。通过QT框架实现三大操作系统界面一致性。系统支持离线运行，内置完整算法库与规范数据库，满足野外作业需求。具体系统参数要求见表1。

表1 软件运行环境

平台名称	系统要求
Windows	64位系统（Win7及以上），4核CPU@2.4GHz，8GB内存，1GB可用磁盘空间
Linux	CentOS 7+/Ubuntu 18.04+，glibc 2.17+，4GB内存，500 MB磁盘空间
macOS	10.15+系统，已安装公证证书，8GB内存，兼容Apple Silicon/M1芯片架构

电气设备的复核原理

1. 变压器容量复核

泵站应进行负荷计算，宜采用需要系数法^[1]，该方法源于负荷曲线的分析。设备功率乘需用系数得到需要功率，多组负荷相加时，再逐级乘以同时系数。对于水闸泵站的复核计算，由于各用电设备的功率均已知，比较适用于采用需要系数法进行负荷计算。

完成变压器负荷计算后，可以根据负荷等级、负荷大小复核主变压器和站用变压器的台数和容量。

泵站负荷等级及供电方式应根据工程性质、规模和重要性合理确定。大中型供排水泵站负荷等级应为二级负荷^[2]，灌溉泵站及经论证对供电可靠性要求不高、中断供电影响程度较小的供水泵站和小型排水泵站，可采用三级负荷。

在有一级负荷、二级负荷的变电站中应装设两台主变压器，当技术经济比较合理时，可装设两台以上主变压器。装有两台及以上主变压器的变电站，当断开一台主变压器时，其余主变压器容量(包括过负荷能力)应能满足全部一级负荷、二级负荷用电的要求^[2]。

站用变压器容量应满足各种运行方式下可能出现的最大站用电负荷。采用2台站用变压器时，其中一台退出运行时，另一台应能承担全部重要站用电负荷或短时最大负荷^[3]。

2. 电气设备的分断能力和动、热稳定复核

泵站运行一段时间后，由于供电电网的不断发展，电网参数必将发生变化，从而引起降压站的短

路电流变化。电气设备的分断能力、动稳定和热稳定是否满足运行要求,主要取决于泵站变电站各电压等级母线的短路电流,因此,需要首先计算短路电流。

图2为典型的泵站电气主接线,采用35 kV供电,两路进线,35 kV侧采用线变组接线。10 kV(6 kV)采用单母线分段,正常运行时,分段断开,两段母线分列运行。0.4 kV也采用单母线分段接线,正常运行时,分段断开,两段母线分列运行。

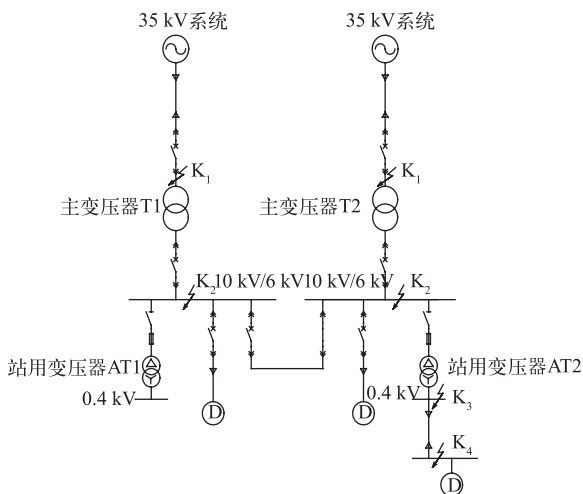


图2 典型的电气主接线

图3为图2的短路计算等值电路。由于正常运行时10 kV/6 kV母线分段断路器断开,两段母线分裂运行,进行短路计算时不考虑分段断路器合上的运行方式。

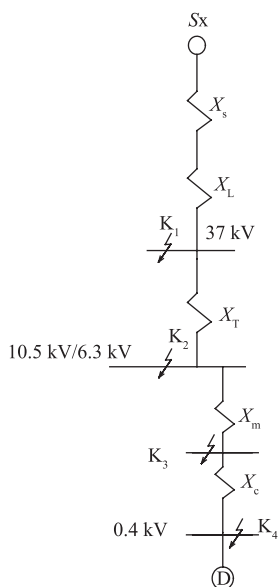


图3 短路计算等值电路

2.1 6 kV及以上电压等级短路电流计算

对于中(高)压短路点,如图2、图3中 K_1 、 K_2 短路点,短路电流计算时一般不计电阻影响。一般情况下,泵站远离电网主要电源点,即短路点计算电抗 $X_{*c} \geq 3$,短路电流计算时不计交流分量在整个计算过程的衰减。

因此,三相短路电流计算公式为

$$I_K^* = \frac{I_j}{X_{*c}} \quad (1)$$

$$I_j = \frac{S_j}{\sqrt{3}U_j} \quad (2)$$

式中, I_K^* 为电源系统提供的短路电流交流分量有效值,kA; I_j 为短路点短路电流基准值,kA; X_{*c} 为短路点的计算电抗标幺值; S_j 为基准容量MV·A; U_j 为基准电压(kV)。

短路冲击电流计算公式为

$$i_{ch} = \sqrt{2}K_{ch}I_K^* \quad (3)$$

式中, K_{ch} 为短路电流冲击系数; T_f 为短路电流直流分量衰减时间常数,s; i_{ch} 为短路冲击电流,kA。

对于短路点 K_2 ,除需要计算系统的短路电流外,还需要计算电动机反馈电流。 K_2 点短路电流周期分量起始有效值计算公式为

$$I_{K2}^* = I_{BK2}^* + I_{DK2}^* \quad (4)$$

式中, I_{BK2}^* 为 K_2 点短路时系统提供的短路电流周期分量起始有效值,kA; I_{DK2}^* 为 K_2 点短路时电动机反馈电流周期分量起始有效值,kA。

同时运行的高压电动机总容量在1 500 kW及以下时,可不计电动机提供的反馈电流。

I_{BK2}^* 按式(1)计算, I_{DK2}^* 按式(5)计算^[4],可得

$$I_{DK2}^* = K_{qd}I_{nd} \times 10^{-3} = K_{qd} \frac{P_{nd}}{\sqrt{3}U_{nd}\eta_{nd}\cos\varphi_{nd}} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中, K_{qd} 为电动机平均反馈电流倍数; I_{nd} 为计及反馈的电动机额定电流之和,A; P_{nd} 为计及反馈的电动机额定功率之和,kW; U_{nd} 为电动机的额定电压,kV; $\eta_{nd}\cos\varphi_{nd}$ 为电动机的平均额定效率和功率因数乘积。

K_2 点短路冲击电流也需要计及电动机反馈电流,计算公式为^[4]

$$i_{k2ch} = \sqrt{2}(K_{chB}I_{BK2}^* + K_{chD}I_{DK2}^*) \quad (6)$$

式中, K_{chB} 为电源系统提供的短路电流冲击系数;

K_{chD} 为电动机反馈电流冲击系数。

2.2 0.4 kV电压等级短路电流计算

在计算220 V/380 V网络短路电流时,除需要计及电气设备、电缆的电阻外,计算原理与高压系统相同。

2.3 电气设备的分断能力和动、热稳定复核

在完成短路电流的起始周期分量有效值,以及短路冲击电流计算后,就可以对照设备铭牌复核电气设备的分断能力和动稳定复核。

根据短路电流热效应可实现电气设备的热稳定复核。

3. 电动机启动复核

电动机启动计算应按供电系统最小运行方式和机组最不利的运行组合形式进行^[2]:①当同一母线上全部连接同步电动机时,应按最大一台机组首先启动进行启动计算;②当同一母线上全部连接异步电动机时,应按最大一台机组最后启动进行启动计算;③当同一母线上连接有同步电动机和异步电动机时,应按全部异步电动机投入运行,再启动最大一台同步电动机的条件进行启动计算。

3.1 高压电动机启动时母线压降计算

高压电动机启动电压计算公式为^[5]。

$$U_{d*} = \frac{1.05}{1 + \frac{S_{qd} + S_1}{S_{nb1}}} \times U_{z1} \quad (7)$$

$$S_{qd} = \sqrt{3} U_{nd} I_{nd} = \frac{K_{qd} P_d}{\eta_d \cos \varphi_d} \quad (8)$$

式中, U_{d*} 为电动机启动时端电压(标么值); S_{qd} 为电动机启动容量, kVA; U_{nd} 为电动机额定电压, kV; I_{qd} 为电动机启动电流, A; K_{qd} 为电动机启动电流倍数; P_d 为电动机额定容量, kW; $\eta_d \cos \varphi_d$ 为电动机额定效率和额定功率因数的乘积; I_{nd} 为电动机额定电流, A; S_1 为启动前高压母线上已带负荷, kVA; U_{z1} 为主变压器阻抗电压(标么值)。

高压电动机启动压降计算公式为

$$\Delta U_{d*} \% = (1 - U_{d*}) \times 100\% \quad (9)$$

式中, $\Delta U_{d*} \%$ 为电动机启动时机端压降百分数; U_{d*} 为电动机启动时端电压(标么值)。

3.2 380 V电动机启动时机端压降计算

380 V电动机启动时机端电压计算与高压电动机类似,不再赘述。

3.3 电动机启动电压复核

电动机正常启动时,所连接母线的电压降应满足下列要求^[2]:

①母线电压降不宜超过额定电压的15%;②当电动机启动引起的电压波动不致破坏其他用电设备正常运行,且启动电磁力矩大于静阻力矩时,电压降可不受15%额定电压的限制。

4. 电力电缆截面选型复核

电缆线路回路长期运行工作电流 I_c 、电缆实际工况下允许载流量 I_a 和电缆回路保护断路器整定电流值 I_{set} 需满足式(10)。

$$I_c < I_{set} < I_a \quad (10)$$

$$I_a = K I_w \quad (11)$$

式中, I_w 为电缆在标准敷设条件下的额定载流量, A; K 为电缆综合敷设系数。

电缆导体在短路电流热效应下允许的最小截面积计算公式为^[6]

$$S \geq \frac{\sqrt{Q}}{C} \quad (12)$$

式中, S 为电缆导体截面, mm^2 ; Q 为短路电流热效应, $\text{kA}^2 \cdot \text{s}$; C 为导体热容量系数。

结束语

基于现行设计规范(标准),以Pyqt5图形化界面为框架,Sqlite为交换数据库开发了一套泵站电气设备复核软件(PERS),支持跨平台运行,实现泵站所有电气设备的复核计算。该系统已经在上海勘测设计研究院有限公司多个项目中得到应用,大大提高电气设备复核计算的效率和准确率。EA

(收稿日期:2025-07-04)

参考文献

- [1] 城镇排水泵站设计标准[S]: DGJ 08-22—2018.
- [2] 泵站设计标准[S]: GB50265—2022.
- [3] 35 kV~110 kV变电站设计规范[S]: GB5059—2011.
- [4] 水利水电工程三相交流系统短路电流计算导则[S]: SL585—2012.
- [5] 水利水电工程厂(站)用电设计规范[S]: SL 485—2010.
- [6] 电力工程电缆设计标准[S]: GB 50217—2018.