

# 长距离输水系统泵站供电设备自启动优化方法

徐玲玉

(河北省唐山市水利规划设计研究院,河北 唐山 063000)

**摘要:**在供水泵站供电设备的运行中,如何在脱网条件下使设备实现自启动以减少电网运行负担成为一个研究热点,设计一种长距离输水的供水泵站供电设备自启动优化控制方法。设计由呈现对称分布状态的一次侧探测电路与二次侧探测电路构成的对称谐振判断电路,实施供电设备的谐振判断,确保能够对设备实施自启动优化控制。以不影响系统建模准确性为前提设置假设条件,构建供水泵站供电设备的数学模型。设计供电设备分段启动控制策略,实现供水泵站供电设备的自启动优化控制。测试结果表明,使用设计方法自启动后,设备的输入电流波形、输出电压波形过渡比较平稳,有功功率振荡幅度较小。

**关键词:**长距离输水;对称谐振判断电路;供水泵站;供电设备;自启动优化控制

中图分类号:TP273 文献标识码:A 文章编号:1003-7241(2025)05-0048-05

## Auto-starting Optimization Method for Power Supply Equipment of Pumping Station in Long-distance Water Conveyance System

XU Ling-yu

(Hebei Tangshan Water Resources Planning and Design Institute, Tangshan 063000 China)

**Abstract:** In the operation of the power supply equipment of the water supply pump station, how to realize the self-starting of the equipment under the off-grid condition to reduce the load of the power grid operation becomes a research hotspot. A self-starting optimization control method for the power supply equipment of the water supply pump station with long-distance water transmission is designed. The symmetrical resonance judgment circuit composed of the primary side detection circuit and the secondary side detection circuit in a symmetrical distribution state is designed to implement the resonance judgment of the power supply equipment to ensure that the equipment can be self-started and optimized. The mathematical model of the power supply equipment of the water supply pump station is built on the premise that the accuracy of the system modeling is not affected. It designs the subsection start-up control strategy of the power supply equipment to realize the self-startup optimization control of the power supply equipment of the water supply pump station. The test results of the design method show that the transition of the input current waveform and output voltage waveform of the equipment is relatively stable and the amplitude of active power oscillation is small after the design method is started.

**Keywords:** long-distance water conveyance; symmetrical resonance judgment circuit; water supply pump station; power supply equipment; auto-starting optimization control

### 0 引言

目前,对各种新能源进行大力发展成为各国不约而同的选择。其中,水能作为一种容易获得、无污染的新型清洁能源,被各领域研究学者广泛关注。目前,水能已经成为一种新兴战略性产业,水力发电与水能资源在我国得到了极大规模的发展与不断地开发<sup>[1]</sup>。目前,我国已经在多个地区建设了大型水力发电基地。由于水能具备地域性特征,很多水力发电站位于比较偏远的地区,与负荷中心距离较远,带来了许多难题,如系统的稳定性、调频调峰大规模水电场的集中并网以及远距离输送水电等。这就需要使长距离输水的供水泵站供电设备拥有自启动

能力<sup>[2]</sup>。为实现长距离输水的供水泵站供电设备独立运行以及自启动的能力,对供电设备的控制水平提出了更严格的要求。基于该背景对长距离输水的供水泵站供电设备自启动优化控制方法进行研究,对该问题进行研究具有很强的学术价值与理论意义。对于供电设备自启动控制问题,目前在外国已经有一定研究,而由于国内对于该问题的研究起步较晚,研究成果会相对较少一些。其中文献[3]提出一种基于燃气蒸汽联合循环机组的自启停控制系统,通过对相关机组的工作状态与工作过程加以控制,使机组运作更稳定,也在一定程度上降低了机组的工作成本。文献[4]对汽轮机启动控制系统进行了优化设计。以上方法存在对于设备安全运行有不利影响的问题,为实现现有研究成果的优化,设计一种长距离输水的

供水泵站供电设备自启动优化控制方法。

## 1 供水泵站供电设备自启动优化控制方法设计

### 1.1 供电设备谐振判断

设计一种对称谐振判断电路实施供电设备的谐振判断,确保能够对设备实施自启动优化控制。设计的对称谐振判断电路由两个探测电路构成,分别为一次侧探测电路与二次侧探测电路,二者呈现对称分布的状态<sup>[5]</sup>。通过以下步骤判断供水泵站供电设备的谐振状态:

(1) 用  $U_\alpha$  表示一次侧探测电路中的一次侧电源,用  $U_\beta$  表示二次侧探测电路中的二次侧电源,打开  $U_\alpha$  后,关闭  $U_\beta$ 。用  $S_A$ 、 $S_B$  表示一次侧探测电路中的两个串联开关,用  $S_C$ 、 $S_D$  表示二次侧探测电路中的两个并联开关,用  $R_b$  表示二次侧探测电路中的二次侧探测电阻。闭合  $S_A$ 、 $S_C$ ,断开  $S_B$ 、 $S_D$ ,此时能量由  $U_\alpha$  向  $R_b$  流动。依据电路分析原理,可以用式(1)表示此时流向  $R_b$  的电流。

$$I_b = i \frac{\mu N U_\alpha}{\left( R_c + R_e - i \frac{1}{\mu C_w} + i \mu L_1 \right) \left( R_f + R_d - i \frac{1}{\mu C_r} + i \mu L_2 \right) + N^2 \mu^2} \quad (1)$$

式中,  $i$  指的是对称谐振判断电路的双踪示波系数;  $\mu$  是指电路的频率;  $N$  指的是电路的扰动量;  $R_c$  是指一次侧探测电路中的双边逆变电路等效电阻;  $R_e$  是指一次侧探测电路中的可调电阻;  $C_w$  指的是一次侧探测电路中的电容;  $L_1$  是指一次侧探测电路中的电感;  $R_f$  指的是二次侧探测电路中的双边逆变电路等效电阻;  $R_d$  是指二次侧探测电路中的可调电阻;  $C_r$  指的是二次侧探测电路中的电容;  $L_2$  是指二次侧探测电路中的电容<sup>[6]</sup>。

当供水泵站供电设备系统完全谐振时,式(2)成立。

$$\begin{cases} -\frac{i}{\mu C_w} + i \mu L_1 = 0 \\ -\frac{i}{\mu C_r} + i \mu L_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

此时  $I_b$  可以用下式来表示:

$$I_b = i \frac{\mu N U_\alpha}{(R_c + R_e)(R_f + R_d) + N^2 \mu^2} \quad (3)$$

此时  $I_b$  相位超前  $U_\alpha$  的相位角度数为  $90^\circ$ , 因此可以判断,当下式成立:

$$\psi_1 < 90^\circ \quad (4)$$

式中,  $\psi_1$  指的是  $I_b$  相位超前  $U_\alpha$  的相位角<sup>[7]</sup>。

则供水泵站供电设备系统的失谐状态为感性失谐。

当式(5)成立:

$$\psi_1 > 90^\circ \quad (5)$$

则供水泵站供电设备系统的失谐状态为容性失谐。

(2) 关闭  $U_\alpha$  后,打开  $U_\beta$ ,并使  $S_A$  断开,闭合  $S_B$ 、 $S_C$ 、 $S_D$ ,使能量由  $U_\beta$  向  $R_a$  流动,其中  $R_a$  为一次侧探测电路中的一次侧探测电阻<sup>[8]</sup>。此时用式(6)表示此时流向  $R_b$  的电流。

$$I_b' = \frac{U_\beta \left[ \begin{array}{c} N^2 \mu^2 + \left( R_a + R_c - \frac{i}{\mu C_w} + i \mu L_1 \right) \\ \left( R_d - i \frac{1}{\mu C_r} + i \mu L_2 \right) \end{array} \right]}{N^2 (R_f + R_b) \mu^2 + \left[ \begin{array}{c} 1 + i \mu C_w \\ (R_a + R_e + i \mu L_1) \end{array} \right] \sigma} \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  指的是二次侧探测电路的复阻抗系数,计算公式具体如下:

$$\sigma = R_f \left[ -1 - i \mu C_w (R_b + R_d + i \mu L_2) \right] + R_b \left[ -1 - \mu C_w (-i R_d + \mu L_2) \right] \quad (7)$$

当供水泵站供电设备系统完全谐振时,可以将式(6)简化为下式:

$$I_b' = \frac{U_\beta (N^2 \mu^2 + R_a R_d + R_c R_d)}{R_f R_b R_c + R_a R_b R_d + R_f R_c R_d + R_b R_c R_d + R_a R_b (R_b + R_d) + N^2 R_f \mu^2 + N^2 R_f \mu^2} \quad (8)$$

此时  $I_b'$  相位超前  $U_\beta$  的相位角度数为  $0^\circ$ , 因此可以判断,当下式成立:

$$\psi_2 > 0^\circ \quad (9)$$

式中,  $\psi_2$  指的是  $I_b'$  相位超前  $U_\beta$  的相位角<sup>[9]</sup>。

则供水泵站供电设备系统的失谐发生在一次侧。

当下式成立:

$$\psi_2 < 0^\circ \quad (10)$$

则供水泵站供电设备系统的失谐发生在二次侧。

### 1.2 构建供电设备的动态方程

为完成数学模型的构建,需要在实施假设前,考虑假设条件对模型建立合理性的影响:

- (1) 假设供水泵站供电设备的电源是三相对称正弦波;
- (2) 假设滤波电感为线性电感,忽略其饱和的影响;
- (3) 假设供电设备中的开关器件是理想状态的开关器件,不考虑自身损耗与死区时间<sup>[10]</sup>。

用式(11)表示供水泵站供电设备的拓扑结构。

$$\begin{bmatrix} u_{mA} \\ u_{mB} \\ u_{mC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{nA} \\ u_{nB} \\ u_{nC} \end{bmatrix} = R_m \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + L_m \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中,  $u_{mA}$ 、 $u_{mB}$ 、 $u_{mC}$  指的是供电设备并网侧的三相电压;  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  可代表供电设备的三相电流;  $u_{nA}$ 、 $u_{nB}$ 、 $u_{nC}$  可表示为供电设备交流侧的三相电压; 供电设备中单相进线电阻由  $R_m$  表示;  $L_m$  指的是供电设备的电抗<sup>[11]</sup>。

用  $U_m$  表示  $u_{mA}$ 、 $u_{mB}$ 、 $u_{mC}$  的幅值,用  $U_n$  表示  $u_{nA}$ 、 $u_{nB}$ 、

$u_{nC}$ 的幅值,用 $g$ 表示供电设备的调制比。因此下式成立:

$$\begin{bmatrix} u_{nA} \\ u_{nB} \\ u_{nC} \end{bmatrix} = U_m \begin{bmatrix} \cos(\varphi l + \lambda) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$= \frac{g}{2} U_{DC} \begin{bmatrix} \cos(\varphi l + \lambda) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_{mA} \\ u_{mB} \\ u_{mC} \end{bmatrix} = U_n \begin{bmatrix} \cos(\varphi l + \lambda) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\varphi l + \lambda + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $U_{DC}$ 表示供电设备的直流电压<sup>[12]</sup>。

利用上式对式(11)进行abc/dq变换,并构建供电设备的直流电容侧方程,合并变换后获得的方程与直流电容侧方程,实现供电设备动态方程的构建<sup>[13]</sup>。

### 1.3 自启动优化控制

通过设计供电设备分段启动控制策略,实现供水泵站供电设备的自启动优化控制。在策略的设计过程中,首先需要对站内供电设备的电压进行控制,使其外环不能形成有效输出,此时已知的电流d轴分量会根据角系数呈持续上升的状态。当供电设备直流侧输出电压持续稳定输出时,输出值为设备稳定运行时的0.9倍,可重新接入电压外环<sup>[14]</sup>。

在该控制策略的实施中,两个参数的设置非常关键,分别为有功给定电流最小值 $I_{rmin}$ 与有功给定电流最大值 $I_{rmax}$ 。当 $I_{rmin}$ 设置过小或过大,供电设备从三相全桥不可控直接切换至整流可控时,设备直流侧输出电压可能出现突然增加的问题,使电容迅速充电,所产生的较大的充电电流可能导致交流侧输入浪涌电流。而当 $I_{rmax}$ 设置过小,会使投入电压外环后供电设备的具体数值难以进行调节,增加设备的调节时间。

供电设备分段启动控制策略下的设备分段自启动过程如下:

当供电设备处于不可控整流状态时,对其直流母线的电流 $I_{w0}$ 与电压 $U_{w0}$ 进行检测,根据检测结果可获得供电设备的输出功率,该参数可表示为 $P_d$ 。若在参照功率

守恒定律的基础上,不计线路电阻损耗与开关损耗,可以得到下式:

$$P_d = 3G_d I_d \cos \zeta = 3G_d I_{rmin} = I_{w0} U_{w0} \quad (14)$$

式中, $G_d$ 指的是供电设备电网相电压; $I_d$ 是指供电设备交流侧的有效输入电流值; $\zeta$ 指的是 $G_d$ 与 $I_d$ 的夹角。

根据上式可以对 $I_{rmin}$ 进行计算。供电设备依据 $I_{rmin}$ 从三相全桥不可控直接切换至整流可控。

当电容两端电压的检测结果为 $0.9U_w$ 时,其中 $U_w$ 为设备稳定运行时的电压,则有功给定电流 $I_r$ 的值取 $I_{rmax}$ ,对直流母线的电流 $I_h$ 进行检测,并等待供电设备进入稳定状态。此时 $I_{rmax}$ 的计算公式具体如下:

$$I_{rmax} = \frac{0.9U_w I_h}{3G_d} \quad (15)$$

依据 $I_{rmax}$ 的值加入电压外环。

参照交流侧电流的d轴分量表达式,若切除供电设备电压外环,有功给定电流 $I_r$ 与规定的有功给定电流 $I_r'$ 值是相等的。

就此完成供水泵站供电设备的自启动优化控制。

## 2 案例测试

### 2.1 项目测试与对比方法选择

对于文中的长距离输水的供水泵站供电设备自启动优化控制方法,通过案例测试的方法对其优化控制性能进行测试。应用文中方法对南水北调工程中的某个供水泵站中的供电设备进行自启动优化控制,使设备能够在脱网条件下实现平稳启动和带载运行。该设备由主电路、驱动电路模块、采样电路模块、控制电路模块等构成,设备参数具体如下:

直流侧给定电压:750 V;

开关频率:5.5 kHz;

额定输出功率:70 kW;

交流滤波电感:8 mH;

直流侧电容:2 550 uF。

首先用文中的对称谐振判断电路对实验供电设备实施谐振判断,确定供电设备处于非谐振状态后,依据构建的供电设备动态方程,通过文中的分段启动控制策略实现其自启动优化控制。测试设备自启动时的输入电流波形与输出电压波形。并测试设备自启动时的有功功率,观察文中方法的有功功率振荡幅度。

在测试中,将燃气蒸汽联合循环机组的自启停控制系统与优化设计的汽轮机启动控制系统作为对比方法,共同进行性能测试,分别用方法1、方法2来表示这两种对比方法,以简化表达方式。

## 2.2 设备自启动时的输入电流波形测试结果

首先测试文中方法与方法1、方法2在设备自启动时的输入电流波形,测试结果如图1所示。其中由上到下的测试结果分别为文中方法与方法1、方法2的测试结果。

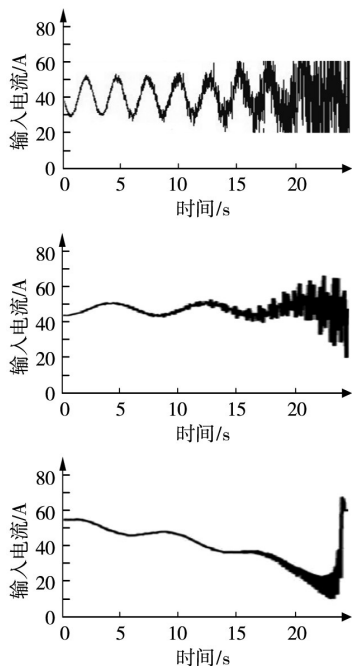


图1 输入电流波形

根据图1的测试结果,使用文中方法自启动后,设备的输入电流波形过渡比较平稳,说明通过该自启动方式能够对启动时的冲击电流进行有效抑制。而使用方法1、方法2自启动后,设备的输入电流波形过渡不够平稳,说明通过这两种自启动方式自启动后,满载运行时,启动冲击电流有可能击穿设备主电路或烧坏设备绝缘皮,对于设备的安全运行有不利因素。

## 2.3 设备自启动时的输出电压波形测试结果

三种测试方法下,设备自启动时的输出电压波形如图2所示。其中由上到下的测试结果分别为文中方法与方法1、方法2的测试结果。

根据图2的测试波形,使用文中方法自启动后,设备的输出电压波形过渡比较平稳,说明通过该自启动方式能够实现启动时输出电压超调问题的有效抑制。而使用方法1、方法2自启动后,设备的输出电压波形过渡不够平稳,说明通过这两种自启动方式自启动后,对于输出电压超调问题的抑制效果较差。

## 2.4 设备自启动时的有功功率测试结果

三种测试方法下,设备自启动时的有功功率测试结果如图3所示。其中由上到下的测试结果分别为文中方法与方法1、方法2的测试结果。

根据图3的有功功率测试结果,使用文中方法自启动后,设备的有功功率振荡幅度较小,说明文中方法对于设

备的稳态调整有很大帮助,而使用方法1、方法2自启动后,设备的有功功率振荡幅度较大,说明这两种方法对于设备的稳态调整帮助较小。

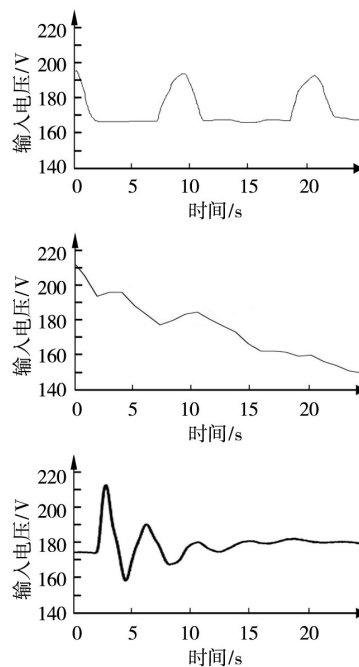


图2 输出电压波形

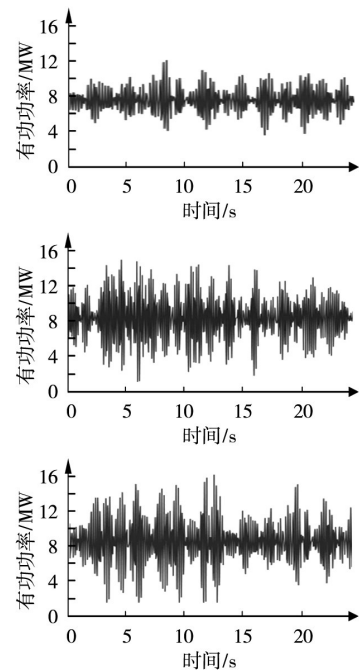


图3 有功功率

## 3 结束语

在供水泵站供电设备自启动问题的研究中,设计了一种长距离输水的供水泵站供电设备自启动优化控制方法,实现了供电设备脱网条件下的平稳自启动与带载运行,取得了有意义的研究成果。

(下转第84页)