

泵站大容量变频器 与电动机变速运行 研究与实践

云南省水利水电勘测设计研究院
牛栏江—滇池补水工程协调领导小组办公室



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

泵站大容量变频器 与电动机变速运行 研究与实践

云南省水利水电勘测设计研究院
牛栏江—滇池补水工程协调领导小组办公室



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书从工程运用角度出发,对高扬程、大流量提水泵站的变频器和电动机的运用现状、生产状况、变频运行的必要性、变频器元件的发展过程、变频器及电动机类型的分析比较、国内变速电动机的调研等相关理论和研究进行了系统、全面的介绍。其主要内容分为水泵调节方式与变频器设置的必要性,大功率变频器用电力电子器件的分类和性能,变频器类型及选择分析,调速控制系统介绍,使用变频运行对电网电能质量分析,变频器不设旁路(脱频)的分析,电动机选型比较,电动机设计、结构、工艺及主要技术规格要求,电动机国产化的可行性调研及对各章的总结,共十一章。书中包括作者的调研、理论研究、分析计算和评价。

本书可作为从事水利水电工程及泵站工程的建设单位、设计单位、监理单位、施工单位技术人员的参考书,也可供大专院校水利水电工程、机电工程等专业学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

泵站大容量变频器与电动机变速运行研究与实践/云南省水利水电勘测设计研究院,牛栏江-滇池补水工程协调领导小组办公室编. —北京:中国电力出版社,2014.1
ISBN 978-7-5123-4944-5

I. ①泵… II. ①云… ②牛… III. ①泵站-变频器-研究②泵站-电动机-变速传动-研究 IV. ①TV675

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 224907 号

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.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 1 月第一版 2014 年 1 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 7 印张 182 千字

印数 0001—2000 册 定价 30.00 元

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

编 委 会

主 编 禹向东

副主编 梅 伟 蔡云华

主要编写人员

云南省水利水电勘测设计研究院：

郭建平 孟立明 邓东明 邢海仙

苏正猛 陈 钧 杨明珍 闫黎黎

牛栏江—滇池补水工程协调领导小组办公室：

冯晓东 代艳芳 王 飞 钟 勇

◀ 序 一. ▶

牛栏江—滇池补水工程的建设，给昆明人民带来了改善滇池的希望，亦为昆明滇池流域经济社会发展和人民生活提供了稳定可靠的应急备用水源。工程由水库、泵站、输水线路三大枢纽组成，建成后每年可向滇池补水约 5.72 亿 m^3 优质水源，使滇池有望在不远的将来水质得到根本改善，再现滇池的高原明珠风采。

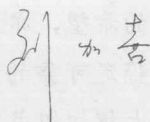
在云南建设大型调水工程有着输水距离远、提水泵组扬程高等特点，干河泵站就是一个典型。该泵站扬程高、流量大，主电动机单机容量达 22.5MW。如此大型规模的泵站，涉及的水泵、电动机、变频器等主体设备，在研发、设计、制造领域都存在诸多技术难题，面临着极大的技术挑战。

大型电动机与变频器技术是干河泵站核心关键设备，是确保泵站能否顺利运行的主要技术保障，20MW 以上容量的变频技术在提水泵站中的应用国内尚属首次，国外亦不多见。书中依据工程特性、水泵性能提出了变频调节设置的必要性，对各类大型变频器在工程中的运用进行了分析调研，探讨了变频器的选型范围，主要技术参数及变频器与电动机配合等技术要点，提出了本工程变频器技术的解决方案。书中特别针对大型电动机国产化进行了大量调研和对比工作，为类似工程选择国产电动机提供了技术支撑和有益经验。

本书技术数据详实，具有理论分析和实际案例，实用性

较强，研究成果可为类似大型泵站建设提供借鉴。目前泵站抽水试运行已获得成功，成果已得到验证，作为水利工作者我为之欣慰，也借此书出版之际对建设过程中给予我们帮助的同行人和专家致以真诚的感谢。

云南省水利厅副厅长



2013年8月27日于昆明

◀ 序 二 ▶

我国水资源时空分布不均,近年来许多重要需水区域水资源匮乏的问题越来越突出,为解决区域用供需水矛盾,国内大型长距离跨流域调水工程已越来越多,比较典型的项目有南水北调、引黄济晋等,云南省近期也启动了滇中调水工程前期工作。由于调水江河水源多处于海拔高程较低位置,很难实现自流供水,很多长距离供水项目基本上采用扬水与输水洞、渠相结合的方式。云南省牛栏江—滇池补水工程就是一个典型的提水与长距离输水相结合的供水工程,工程由德泽水库、干河泵站及输水线路所组成,提水扬程 187~238m,输水流量 $23\text{m}^3/\text{s}$,输水距离 115km,其中大容量电动机及变频技术无疑是本工程核心构成和技术难点。

大容量变频器种类繁多,但各自有一定适用局限,如何选择既能确保安全可靠,性价比又较好的变频器方案是作者及其团体的主要任务。目前我国已建成泵站大容量立轴变速水泵电动机主要依靠进口,干河泵站单台电机容量高达 22.5MW,如此大容量的变速电动机能否实现国产化也是本书要回答的问题。

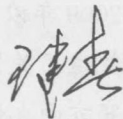
2009 年以来,作者及其团体针对干河泵站大型变频器及电动机运用关键技术问题开展了大量技术调研和交流,在理论研究方面也进行了有益探讨和研究,提出了本泵站一揽子技术解决方案,这些技术成果对于我国大流量高扬程泵站建

设具有较大的实用价值和推动作用。

书中对干河泵站建设的多方面问题进行了分析。在变频运行的必要性方面,通过方案比较,确定采用变频调速方案,以改善水泵工作特性;对大功率电子器件主要参数及性能进行了深入分析,选择了适宜本工程的电力电子器件;对变频器类型做了较为深入的研究,得出泵站选用电流源型变频器(LCI型)、电压源型(VSI)中的三电平、五电平变频器及两电平H桥级联变频器均能满足干河泵站水泵机组变频调速要求的重要结论。电能质量分析方面,以电流源型和电压源型两种类型的变频器作为研究对象,分析了两类变频器整流侧谐波含量、功率因数、无功补偿装置、滤波器等特性对电能质量的影响。对变频器是否设置旁路进行了对比,得出了不设旁路的理论依据。电动机选型着重分析直流电动机和交流电动机,认为应选用同步电动机更具合理性。另外该书还对电机选型要点、电机设计要点及技术规格等做了详细论述,对国内生产企业技术装备、科研人才队伍、创新能力、与国外合作经验、类似工程业绩等方面做了调查分析,认为干河泵站主要机电设备采用国内产品是具备条件的。

该书的出版,将促进同行交流学习,为大型泵站变频器、电动机设计选型提供了思路和借鉴;特别是对电机的国产化,为宏扬民族工业、大力推动我国大型变速电动机应用技术向前发展开创了新的机遇。

云南省水利水电勘测设计研究院院长



2013年8月于昆明

◀ 前 言

昆明滇池被列为全国三大湖泊治理重点之一，治理方式为从外流域调水进入滇池，通过不断置换，改变滇池的水质，使滇池在不远的将来恢复高原明珠的面貌。牛栏江—滇池补水工程承担了向滇池补水的任务，工程由德泽水库、干河泵站及输水线路组成，每年补充滇池水量 5.7 亿 m^3 。干河泵站水泵扬程最大为 233m，单泵引用流量为 $7.67\text{m}^3/\text{s}$ ，装设 4 台机组，单机容量 22.5MW，总装机容量 90MW。在中国，目前可查到的大流量高扬程的泵站有山西万家寨水利枢纽，单机容量 12MW，扬程 120m，水泵、电动机和变频器均为进口设备。干河泵站可借鉴的工程实例较少，电动机和变频器作为泵组的主要设备，设备的选择非常重要，主要的参数确定对工程的影响较大，涉及工程的经济与安全，需要对复杂问题分析和研究，确保工程的顺利建成。调水工程在水利建设中所占比例越来越大，高扬程泵站是一个重要的组成部分，云南省乃至全国规划中的高扬程泵站较多，干河泵站存在的技术问题，其他高扬程大容量泵站建设将会遇到，解决好一个点，将惠及一个面，干河泵站顺利建成，相关理论和经验就有推广的价值，对国家水利事业的建设和发展必将起到推动作用。

牛栏江—滇池补水工程在 2013 年 9 月底将全部建成，早在 2010 年 1 月，建设单位和设计单位就向主管部门提出申请，把“泵站大容量变频器及电动机变速运行应用研究”作为云南省重大水利科研项目，在主管部门批准后，于 2010 年 2 月组建了科研人员队伍，成立了课题组。在历时三年多的时间里，课题组调

研了国内外相似工程,查阅了美国、印度等国家已建高扬程大流量泵站的情况,先后到山西万家寨水利枢纽、北京惠南庄泵站、宁夏宁东泵站考察,邀请国内外电动机和变频器的生产企业做技术交流,特别是针对大型立式同步电动机,对国内企业进行大量的调研,在认识上对电动机国产化有了根本的改变。本书是在工程即将建成,完成了大量的技术工作和研究成果基础上撰写而成的,结合工程实际,在变频器、电动机的选型、元件的要求和主要技术参数确定方面做了大量的工作,为工程的招标设计奠定了雄厚的基础,为泵站建设提供了理论依据。

本书共十一章。第一章介绍工程概况、泵站的特点、高扬程研究的目的和意义;第二章说明泵站在扬程变幅达 47.46m 的特定条件下,设置变频器的作用;第三、四、五章阐述了变频器功率管的种类和发展,变频器的类型和泵站适用的类型,变频器控制原理;第六章针对变频器采用电流源型和电压源型两种变频方式进行仿真分析研究,对降低谐波含量、提高功率因数提出了建议;第七章对变频器设旁路和不设旁路运行在经济和技术上进行了分析,认为不设旁路适用于干河泵站;第八章主要针对同步电动机和异步电动机的特点论述,并通过比较,得出同步电动机在本站运用优于异步电动机的结论;第九章,就电动机设计、结构和工艺提出具体方法和要求;第十章介绍大型水泵立轴调速电动机,国内已建成项目均采用进口设备,本书调研国内大型企业,认为国内企业已具备生产制造能力。

云南省水利水电勘测设计研究院承担牛栏江—滇池补水工程的泵站设计工作,设计过程中,大量的技术问题需要解决,特别是泵站的建设,变频器和电动机是最主要设备,为此成立课题组,对重大技术问题进行了研究,并将研究成果及时运用于工程,从而使泵站建设在技术上得到了保证。

本书由云南省水利水电勘测设计研究院禹向东担任主编,云南省水利水电勘测设计研究院梅伟、郭建平、孟立明、邓东明、

邢海仙、苏正猛、陈钧、杨明珍、闫黎黎、牛栏江—滇池补水工程协调领导小组办公室蔡云华、冯晓东、代艳芳、王飞、钟勇参编。具体分工如下：禹向东（第五章、第六章、第七章、第八章、第九章第一节和第三节、第十一章）、梅伟（第一章、第十章）、郭建平（第二章）、蔡云华（第四章第一节～第三节）、孟立明（第三章、第四章第四节～第六节）、邢海仙（第九章第二节）、陈钧（第四章第七节～第九节），其他人员参与了资料收集、附图绘制和校阅工作。

研究工作及本书的撰写得到了天津电气传动设计研究所有限公司、中水北方勘测设计有限公司、哈尔滨电气动力装备有限公司、中国电力科学研究院的大力支持，在此致以诚挚的感谢。

由于编者的学识和水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者和专家指正。

编 者

2013年8月

< 目 录 >

序一

序二

前言

第一章 概述	1
第一节 背景和意义	1
第二节 前提条件	6
第三节 主要内容	8
第二章 水泵调节方式与变频器设置必要性	9
第一节 水泵调节的必要性	9
第二节 水泵参数	9
第三节 调节方式及变频器设置必要性	11
第四节 水泵调节后运行特性	11
第五节 变频器调试范围选择	14
第三章 大功率变频器用电力电子器件	16
第一节 器件的损耗和散热	16
第二节 大功率电力电子器件分类	18
第三节 晶体三极管、IGBT 和 IEGT	19
第四节 晶闸管、IGCT 和 SGCT	21
第四章 变频器的类型选择分析	25
第一节 调速用变频器分类	25
第二节 晶闸管负载自然换相的交—直—交电流型变频器 (LCI)	26
第三节 PWM 调制的交—直—交电流型变频器	32

第四节	交—直—交电压型两电平低压变频器	36
第五节	电压型中点钳位三电平变频器 (3L-NPC 变频器)	43
第六节	电压型电容钳位四电平变频器	53
第七节	电压型五电平变频器	56
第八节	电压型两电平 H 桥级联变器 (CHB)	60
第九节	多电平矩阵变频器 (串联 MC)	66
第五章	调速控制系统	69
第一节	同步电动机的“它控”变频和“自控”变频	69
第二节	变频调速基础	70
第三节	励磁同步电动机的矢量控制系统和直接转矩控制 系统	76
第四节	无编码器系统和转子位置初始定位	87
第六章	电能质量分析	89
第一节	负荷情况及供电方案	89
第二节	研究工具	93
第三节	电能质量各指标限值	95
第四节	变频器电网侧谐波特性仿真计算	99
第五节	仿真和评估计算	108
第六节	分析结果	132
第七章	变频器不设旁路 (脱频) 的分析	134
第八章	电动机选型	139
第一节	大容量同步电动机和异步电动机原理、技术性能 和运用情况的分析	139
第二节	电动机的选型	141
第三节	调速励磁同步电动机的特点	146
第四节	电动机额定电压、转速和功率计算	152
第九章	电动机设计、结构和工艺	156
第一节	电动机选型要点	156
第二节	电动机设计要点	157

第三节 技术规格及要求	159
第十章 电动机国产化	181
第一节 哈尔滨电气动力装备有限公司	181
第二节 上海电气集团上海电机厂有限公司	185
第三节 东方电气集团东方电机有限公司	191
第四节 小结	197
第十一章 结论	199
参考文献	208

第一章

概述

第一节 背景和意义

正在建设中的牛栏江—滇池补水工程干河泵站是一座大容量、高扬程的泵站，可借鉴的工程极少，工程建设必将面临大量的技术问题，需要付出艰苦的工作，以解决建设中的难题。本书基于泵站的建设，围绕变频器设置的必要性、变频器用电力电子器件、变频器调速运行的电能质量分析、变频器不设旁路分析、变频器和电动机的选型、主要技术参数、结构和工艺要求以及电动机国产化的可行性等方面展开研究工作。

一、工程概况

牛栏江—滇池补水工程是一项水资源综合利用工程，是滇中调水的近期重点工程。近期任务是向滇池补水，改善滇池水环境和水资源条件，配合滇池水污染防治的其他措施，达到规划水质目标，并具备昆明市应急供水的能力；远期任务主要是向曲靖市供水，并与金沙江调水工程共同向滇池补水，同时作为昆明市的备用水源。

工程多年平均设计引水量为 5.72 亿 m^3 ，其中枯季水量为 2.47 亿 m^3 ，汛期水量为 3.25 亿 m^3 ，供水保证率为 70%，水量汛枯比为 56.8/43.2。工程由德泽水库水源枢纽工程、德泽干河提水泵站工程及德泽干河提水泵站至昆明（盘龙江）的输水线路工程组成。

德泽水库水源枢纽工程由混凝土面板堆石坝、左岸溢洪道、右岸泄洪隧洞、左岸发电放空隧洞及坝后电站等组成。大坝为混凝土面板堆石坝，最大坝高 142.4m，水库总库容 44788 万 m^3 ；正常蓄水位 1790m，相应库容 41597 万 m^3 ；死水位 1752m，死库容 18902 万 m^3 ；兴利库容 21236 万 m^3 ，调洪库容 3191 万 m^3 。

干河泵站采取一级提水，安装 4 台机组，电动机单机功率为 22.5MW，总装机容量为 90MW，设计流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ ，设计扬程为 221.2m，最大提水扬程为 233.3m。

输水线路布置在牛栏江左岸，自干河泵站出水池到昆明，线路起始高程为 1973.178m，落点昆明（盘龙江左岸）高程为 1902.950m。输水线路总长度为 115.85km，其中隧洞有 10 条，长 104.52km，占线路总长的 90.23%；渠道有 6 条，长 8.75km，占线路总长的 7.55%；倒虹吸有 3 座，长 1.52km，占线路总长的 1.31%；渡槽有 2 座，长 1.05km，占线路总长的 0.91%。输水线路设计引水流量为 $23\text{m}^3/\text{s}$ 。

二、工程地理位置

牛栏江—滇池补水工程分布于云南省曲靖市沾益县、会泽县以及昆明市的寻甸县、嵩明县和昆明市盘龙区境内。德泽水库和大坝分布于曲靖市沾益县和会泽县的界河牛栏江上，德泽大坝距离昆明市公路里程 173km，距曲靖市 84km，距沾益县 72km。

干河泵站位于曲靖市会泽县与昆明市寻甸县的界河—牛栏江左岸一级支流干河的右岸（寻甸县境内），布置在德泽水库库尾，距德泽水库坝址 17.7km（河道距离）。

输水线路布置在牛栏江左岸，分布于昆明市寻甸县、嵩明县和昆明市盘龙区境内。

输水线路起点为干河泵站出水池出口，输水线路落点位于昆明市松花坝水库下游约 3km（河道距离）的盘龙江左岸，汇入盘龙江。

三、干河泵站

为满足牛栏江—滇池补水工程长距离输水系统能实现自流至

昆明滇池，干河泵站承担着从德泽水库库区扬水至高程 1972.749m 出水池的提水任务。泵站枢纽由库区取水口、有压引水隧洞、引水调压井、厂房洞室、出水管道、地面出水池、工作竖井、地面 GIS 站、地面副厂房及主交通洞、辅助交通洞等组成。

干河泵站用电负荷主要包括泵站水泵机组和站用负荷，最大负荷接近 70MW，最大负荷年运行小时数为 6910h；其中泵站主电动机负荷为 67.5MW，站用电负荷约 2MVA。主要用电负荷为 II 级，电源采用 2 回 110kV 进线，线路按全备用考虑，即每回进线均应满足泵站的负荷要求。110kV 采用单母线分段接线，设两台主变压器，主变压器容量为 $2 \times 50\text{MVA}$ ，采用有载调压变压器，主变压器降压为 10kV，10kV 采用单母线分段接线。10kV 侧设有 12 回出线（电动机出线 4 回，励磁变压器出线 4 回，站用变压器出线 2 回，无功补偿出线 2 回）。

干河泵站厂房分为地下主厂房和地面副厂房两部分，通过直径 9m、深约 115m 工作竖井相连。主厂房为地下式厂房，设有电机层、中间层、水泵层和球阀层。地面副厂房建一幢综合楼，呈“L”形布置，共四层。地面降压站 110kV 配电装置采用 GIS 户外布置，两台主变压器布置于控制楼与 GIS 中间，户外电容器无功补偿装置布置于控制楼外侧。

四、目的和意义

干河泵站总装机容量 90MW，单机容量 22.5MW，为目前可查中国乃至亚洲水泵立轴、变速电动机单机容量最大，设计可借鉴的仅有山西万家寨泵站（单机容量 12MW）。本泵站扬程高，流量大，最高扬程为 233.3m，对应单机流量 $Q=6.9\text{m}^3/\text{s}$ ，最低扬程为 185.85m。对应单机流量为 $7.67\text{m}^3/\text{s}$ ，水泵扬程变幅达 47.46m，技术难度大，存在较多的瓶颈，对电动机和变频器的运用研究是十分必要的。

1. 变频器

变频器为泵站主要运行设备，是实现电动机变速运行、连接电网和电动机的中间纽带。变频器由输入变压器、整流元件、直