

# 抽水蓄能电站自动控制技术 研究与应用

中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会  
中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会

编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 抽水蓄能电站自动控制技术 研究与应用

中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会  
中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会

编



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书为中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会联合中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会,举办的2016年度“抽水蓄能电站自动控制技术应用研讨会”会议论文集,共收录85篇论文,内容涵盖机组SFC、发电机励磁、发变组保护、机组自动化等多个领域,内容丰富、涵盖面广、实用性强,对交流机组自动化设备运行、检修和维护经验,探讨技术发展趋势,推动创新技术成果应用,提高设备运行的安全性和可靠性均有较高的参考价值和借鉴意义,可供相关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能电站自动控制技术研究与应用 / 中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会, 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016. 8  
ISBN 978-7-5170-4682-0

I. ①抽… II. ①中… ②中… III. ①抽水蓄能水电站—自动控制系统—文集 IV. ①TV743-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第211327号

书 名	抽水蓄能电站自动控制技术研究与应用 CHOUSHUI XUNENG DIANZHAN ZIDONG KONGZHI JISHU YANJIU YU YINGYONG
作 者	中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会 编 中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 29.25印张 767千字
版 次	2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷
定 价	198.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

随着我国电力行业尤其是可再生能源发电的快速发展,抽水蓄能电站的作用日益突显。“十二五”期间,各设计单位、装备制造单位、运行单位在设备选型、设计、调试和运维方面也积累了一些经验;“十三五”期间,将迎来抽水蓄能电站建设高潮。

为促进抽水蓄能机组静止变频器(SFC)、励磁、调速和保护等装置的技术交流,中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会联合中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会,于2016年3月24—25日在深圳举办2016年度“抽水蓄能电站自动控制技术应用研讨会”,共同交流机组自动化设备运行、检修和维护经验,探讨技术发展趋势,推动创新技术成果应用,提高设备运行的安全性和可靠性,促进和保障抽水蓄能机组及电网的安全稳定运行。

大会得到了各界热烈的响应,征得论文108篇,经专家教授评审,最终确定85篇论文入选本届会议。

在论文出版编辑过程中,我们得到了有关单位和人员的大力支持和帮助。借此机会,对积极组织、推荐论文的各发电公司、设计院、电科院、高校、设备制造厂等单位的领导、工作人员和所有提交论文的作者表示衷心的感谢。

本届会议是在中国水力发电工程学会电力系统自动化专业委员会、中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会直接领导下召开的,多位行业内的前辈和专家学者给予了细致的关怀和指导。南京南瑞继保电气有限公司对本次会议给予了大力支持。中国水利水电出版社对本论文集的出版给予了热情的支持和帮助,在此一并致谢。

编者

2016.3

# 目 录

## 前言

## 机 组 SFC

- 一种 SFC 转子初始位置检测方法的改进研究 ..... 江 楠, 苏家财, 胡华荣, 孙金超 (3)
- 同步电机转子静止电气位置检测方法概述 ..... 刘 腾, 闫 伟, 石祥建, 吴 龙 (9)
- 抽水蓄能机组变频启动同期调控参数匹配方法探讨 ..... 方军民, 郑小刚 (13)
- PCS—9575 静止变频系统的研制与应用 ..... 周吉琦 (20)
- 抽水蓄能机组与燃机发电机组的 SFC 系统对比分析 ..... 胡羽川, 丁 凯, 舒 欣, 徐华安 (26)
- 抽水蓄能电站静止变频器运行及故障分析 ..... 邱雪俊, 汪卫平 (30)
- 抽水蓄能电站低频自启动功能设计研究 ..... 张显伟, 胡纪岭, 尹和松, 李言龙 (36)
- 抽水蓄能机组稳定运行区域分析 ..... 丁焯楠, 陈灵峰, 杨文道 (42)
- IGBT 在响洪甸抽水蓄能电站 SFC 中的应用 ..... 杨 涛 (47)
- 某抽蓄电站静止变频器典型设计 ..... 吕 滔, 秦 俊 (54)
- 抽水蓄能电站 SFC 的设计与工作机制 ..... 伍献方, 肖建文 (59)
- 仙游抽水蓄能电站 SFC 的应用与分析 ..... 余 睿, 林文峰 (65)
- 浅述宜兴抽水蓄能电站黑启动过程 ..... 宋晋红, 蒋明君, 徐 伟 (70)
- SFC 启动基本原理及典型故障分析 ..... 梁绍泉, 何双军 (76)
- 抽水蓄能电站 SFC 典型故障分析与处理 ..... 阚朝晖, 陈 佳 (82)
- 呼蓄电站静止变频器系统的原理及应用 ..... 康晓威 (84)
- 静止变频器动态过流故障分析及处理措施 ..... 荆大龙 (89)
- 宝泉电站 SFC 冷却控制分析及故障处理 ..... 康晓义, 栗庆龙, 李隆飞 (93)

## 发 电 机 励 磁

- 抽水蓄能变速机组励磁系统关键技术综述 ..... 吕鑫昌, 田 侃, 李 伟 (101)
- 抽水蓄能机组过励限制功能分析与实测研究 ..... 吴跨宇, 卢岑岑, 沈轶君 (108)
- 抽水蓄能机组网源协调重要参数配合分析 ..... 叶炜敏, 郑树青, 王梓琪 (116)
- ABB UNITROL6800 励磁系统建模研究 ..... 江 伟 (124)
- 抽水蓄能电站励磁系统电气制动功能应用 ..... 郑 哲, 方军民 (132)
- 抽水蓄能发电机励磁开关运行状态分析与优化 ..... 朱 溪, 邱雪俊, 龚 鸣 (139)
- 某抽水蓄能电站灭磁开关合闸失败原因分析 ..... 张 斌, 梅松竹, 李晟宇 (143)
- 抽水蓄能电站励磁通信模块改硬接线分析 ..... 毕 旭, 付建忠, 孟德霞 (150)
- 抽水蓄能电站水泵变频启动中励磁控制方式综述 ..... 韩 兵, 程 伟, 吴 龙 (154)
- 大型抽水蓄能机组励磁系统典型配置和策略 ..... 郭春平, 余 振 (157)
- 浅述溧阳抽水蓄能机组励磁系统控制流程 ..... 李满洛, 高 熹, 范李峰 (166)

发电机灭磁开关动作时间计算及编程 .....	范文捷, 王梓琪, 郑树青 (170)
琅琊山抽水蓄能电站励磁控制系统改造 .....	曹杰, 熊续平 (174)
浅谈仙居抽水蓄能电站励磁系统 .....	吴杰, 朱溪, 李潇洛 (180)
浅析东芝 TOSATEX-1000 型励磁小电流试验 .....	张建伟, 刘洋 (186)
洪屏电站励磁系统灭磁开关选型分析 .....	蔡龙 (190)
抽水蓄能电站励磁调节器的调试应用 .....	黄剑煌, 周霖轩 (195)
ABB Spec6298 碳化硅组件型式试验报告数据分析 .....	周尚军 (200)

## 发变组保护

大型水轮发电机失磁保护原理优化探讨 .....	沈全荣, 陈佳胜 (207)
一种抽水蓄能电站主变差动保护实现的软件算法 .....	危伟, 姜跃东 (212)
浅谈抽水蓄能电站主变差动保护电流极性动态校验方法 .....	王从显, 罗胤, 任子超 (219)
抽水蓄能机组保护闭锁方式优化 .....	张冰冰, 孟繁聪, 李凌飞 (226)
励磁绕组匝间短路监测方法研究 .....	张冰冰, 蒋洁青 (230)
机组背靠背启动中主变大差动保护动作浅析 .....	周昆, 刘佳宝, 刘晓丹 (234)
某抽水蓄能电厂新增母差保护方案探讨 .....	刘仁, 张飞, 刘锋, 吕滔 (240)
水电站非有效接地系统单相接地故障分析 .....	郝国文 (245)
低频三次谐波电压对注入式定子接地保护的影响及防误措施 .....	蔡朝辉, 贺儒飞 (250)
一起主变冲击合闸引起的保护动作分析 .....	王建波, 刘晓辉, 罗红俊 (256)
蒲石河抽水蓄能电站机组低频自启动装置研究与应用 .....	王少华 (262)
一起 SFC 输入变差动保护动作分析 .....	胡玉梅, 刘洋, 桂中华 (270)
潘家口蓄能机组差动保护和失灵保护改进研究 .....	苏志斌, 陈泽升, 孟德霞 (276)
探究抽水蓄能机组继电保护定值计算方法 .....	张杨 (284)
基于数据挖掘的继电保护可靠运行短板分析 .....	黄福强, 刘忠惠, 张鹏, 陈浩森, 杨帆 (288)
发电机出口电压互感器一次保险熔断的思考 .....	孙大根, 袁永生, 李军路 (296)
一起 SFC 输入开关零序过流保护动作分析及故障处理 .....	方书博, 姜彦芳 (299)
宝泉电站 1 号机组低压过流保护动作跳闸分析 .....	霍献东, 张旭, 方书博, 常东亮, 秦鸿哲, 康晓义, 臧克佳 (303)
换相闸刀 A1 相合闸不到位情况及处理 .....	宋晋红, 蒋明君, 蒋洁青 (308)
发电机转子绝缘保护误动分析及处理 .....	徐卫中 (313)
某抽水蓄能电站机组 SCP 转 P 工况主变大差保护动作事件浅析 .....	胡梦辰, 吕鹏飞, 梁睿光 (317)
一起 6kV 辅机单相接地故障导致机组跳闸事件的分析 .....	孙迪 (322)
直流接地和合环巡检及查找的关键技术 .....	毛举, 卢波, 石建辉 (327)
基于全分支电流测量的数字化发电机保护在观音岩水电站的应用 .....	方善臣, 王凯, 邓涛, 周方群 (333)
改进 DFT 算法在微机保护中的应用 .....	倪群辉, 侯炜, 王栋涛, 陈俊 (340)

## 机组自动化

### 清远抽蓄电站计算机监控系统研制与应用

..... 刘晓波, 赵勇飞, 彭煜民, 王德宽, 白剑飞, 张学锋, 胡志斌 (349)

抽蓄机组调速系统液压装置设计原则 ..... 蔡卫江, 陈明莉, 冯启文, 许 栋 (354)

单导叶调速器导叶状态监测设计与分析 ..... 王洪博, 夏 鑫 (360)

天荒坪监控系统设备状态监测研究与应用 ..... 马晓晨, 范建强 (367)

水电站流量测控问题研讨 ..... 刘万景, 郝国文, 张永会, 宋旭峰, 徐卫中 (373)

基于小波分析的振动信号特征提取算法 ..... 陈 佳, 全风云 (380)

### 清远抽水蓄能电站监控系统机组联合控制

..... 赵勇飞, 刘晓波, 彭煜民, 韩文杰, 王德宽 (386)

抽蓄机组 SFC 测速装置及其测速方法 ..... 梅高鑫, 何林波, 袁鹏展 (390)

适用于抽水蓄能机组的分段关闭装置 ..... 钱 凤, 车佳磊, 何林波 (394)

水电站控制系统网络安全现状及风险分析 ..... 张志华, 郭 江, 秦继伟 (398)

泰山抽水蓄能电站监控系统故障的查找与分析 ..... 王洪博, 王 彬 (402)

关于 1 号机组球阀看门狗故障的分析处理 ..... 王洪博, 李新煜 (406)

阐述水电站电气二次设备安装调试对策 ..... 乔卫丽, 吉崇冬 (410)

AGC 系统在新安江电厂的应用 ..... 夏书生 (413)

白山发电厂机组油压装置电气控制系统设计 ..... 滕 巍 (419)

基于水电站监控系统的电量采集开发应用 ..... 杨芳华, 陈厚珍, 林建兴, 林 真 (423)

浅谈水轮机调速器系统调试及维护 ..... 林建兴, 谢 强, 陈厚珍, 陈仲章 (426)

### 瀑布沟、深溪沟及尼日河三地峡谷区域无线泄洪报警系统研究与实施

..... 李军路, 任泽民, 黄天文, 邱 华 (429)

基于水头变幅巨大的减压供水技术的研究与应用 ..... 任泽民, 武 彬, 敬燕飞 (432)

深溪沟水电站综合站用电率异常升高分析 ..... 孙艳景, 黄天文 (436)

浅析智能水电站发展方向及关键技术 ..... 程 浪, 李文金, 刘德磊 (439)

云计算在水电站的运用探讨 ..... 程 浪, 李文金, 刘德磊 (444)

龙开口电站计算机监控系统 ..... 李文金, 程 浪, 刘德磊 (448)

抽水蓄能电站各自投方案设计 ..... 曾先锋, 王霄翔, 李宇琦, 王 杰 (453)

# 一种 SFC 转子初始位置检测方法的研究

王 颖<sup>1</sup>, 孟庆刚<sup>2</sup>, 程永涛<sup>1</sup>, 孙会彬<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750001)

**【摘 要】** 针对 SFC 类励磁系统转子初始位置检测方法, 改进了原有以电网最大幅值的正序电压幅值作为主判据对转子初始位置进行辨识, 采用通以初始电流并记录最大的初始电流幅值的方法, 提高了初始位置检测的精度。该方法对励磁系统残压的存在无影响, 通过计算电机磁链在初始位置处幅值变化率与正序电压幅值之比作为最终判断依据, 仿真验证了理论分析的正确性。

**【关键词】** SFC; 转子初始位置; 励磁系统

## 0 引言

# 机 组 SFC

文献[1]通过检测励磁系统的励磁电压, 并分析了励磁电压中包含的转子角度信息, 直接由电压波形幅值, 解决了励磁电压幅值与整流桥相位大小, 且励磁电压幅值比较低, 它依赖于初始角比较准确; 文献[2], 进一步对整流桥求导求导计算出定子电流误差, 由于定子绕组开路存在电感反应, 所以定子电流误差量即为转子初始角; 积分求得定子电流转子初始角, 同时利用采样值做傅里叶级数拟合求出转子初始角。文献[3], 进一步采用傅里叶级数拟合定子电流进行估算; 再采用最小二乘法, 求出一组定子电流与转子初始角误差的方程, 并求解方程求取转子角大小, 但是只适用于励磁电压幅值高, 并不适用于励磁电压幅值低的场合。文献[4]通过利用整流桥定子绕组电压幅值的大小和正负值与初始转子位置对应关系进行判断; 按照记录初始电流幅值最大的原理选取启动方法。当转子位置刚好在计算的范围, 加上初始电流幅值还存在冗余量, 通过计算电压幅值与初始电流幅值之比作为正序电压幅值作为最终判断依据。

## 1 SFC 启动过程分析

### 1.1 SFC 基本结构

静止变频器整流桥部分的主电路由整流桥、滤波单元及基于阻感抗流电感、转子绕组由多支可控硅整流电抗器串联而成。同时为了对整流过电压进行抑制并保证每支可控硅的动态均压要求, 每支可控硅上还常并联一个阻容网络。基于电网侧的桥流桥为整流桥, 按于电机侧的决





# 一种 SFC 转子初始位置检测方法的改进研究

江楠, 苏家财, 胡华荣, 孙金超

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210000)

**【摘要】** 针对 SFC 突加励磁电压测转子初始位置的方法, 由定子感应线电压最大峰值的正负关系确定转子主极相对参考轴所在的位置区域, 按照选取初始电磁转矩最大的原则选取启动方案。当转子主极处在特殊角度时, 最大初始电磁转矩选择存在冗余项, 通过计算电磁转矩变化率选择转矩变化率为正时的导通方案作为最佳启动方法, 仿真验证了理论分析的正确性。

**【关键词】** SFC; 转子初始位置; 电磁转矩

## 0 引言

抽水储能电站用的发电电动机通常为功率达几万到几十万千瓦级的大型同步电机, 当抽水蓄能电站机组由静止状态转入电动水泵工况时, 必须由外部电源供电以启动电机。目前静止变频器 (Static Frequency Converter, SFC) 是最受欢迎的启动方式, 也是世界各国抽水蓄能电站机组首选的启动方式<sup>[1-3]</sup>。机组启动前, 转子主极相对定子绕组轴线的位置不确定。因此, 为了实现对该机组的启动, 必须首先准确地判定转子的初始位置, 以便选择首先给哪两相定子绕组通电流。转子初始位置检测通常使用突加励磁电压的方法。

文献 [4] 通过检测定子绕组的感应电压, 并分析了感应电压中包含的转子角度信息, 直接由电压求得角度值, 由于感应电压值与额定值相比太小, 且感应电压信噪比很低, 准确测量初始角比较困难; 文献 [5] 进一步对感应电压求积分计算出定子磁链矢量, 由于定子绕组开路没有电枢反应, 所以定子磁链矢量位置角即为转子初始角, 积分环节减小了随机干扰的影响, 但同时引进采样直流偏置会使积分出现饱和的问题; 文献 [6] 进一步提出使用低通滤波器对感应电压进行处理, 再利用线电压的计算公式, 计算出电机转子磁通方向与相绕组轴线的夹角, 计算较为复杂。事实上, 如果只是为了确定初始导通方案, 并不需要知道转子精确的位置, 文献 [7] 提出通过判断三相定子感应线电压峰值的大小和正负关系来获得转子所在的区域, 但对初始位置在特殊角度时, 其检查方法和初始导通方案未做说明。本文针对三相定子感应线电压峰值的大小和正负关系确定转子主极相对参考轴所在的位置区域, 按照选取初始电磁转矩最大的原则选取启动方案。当转子主极刚好处在特殊角度时, 最大初始电磁转矩选择存在冗余项, 通过计算电磁转矩变化率选择转矩变化率为正时导通方案作为最佳启动方案。

## 1 SFC 启动过程分析

### 1.1 SFC 系统结构

静止变频器换流桥部分的主电路由整流桥、逆变桥和直流平波电抗器组成。每个桥臂由多支可控硅和阳极电抗器串联而成, 同时为了对换相过电压进行抑制并保证每支可控硅的动态均压要求, 每支可控硅上还需并联一个阻容回路。接于电网侧的换流桥为整流桥, 接于电机侧的换

流桥为逆变桥，当换流桥在整流触发电角控制状态时，可以把交流电整成直流电，当整流桥与逆变桥配合工作时，即构成所谓的“变频器”。系统的基本构成见图1，其中支路桥臂串联的电抗器和均压阻容回路均已忽略。

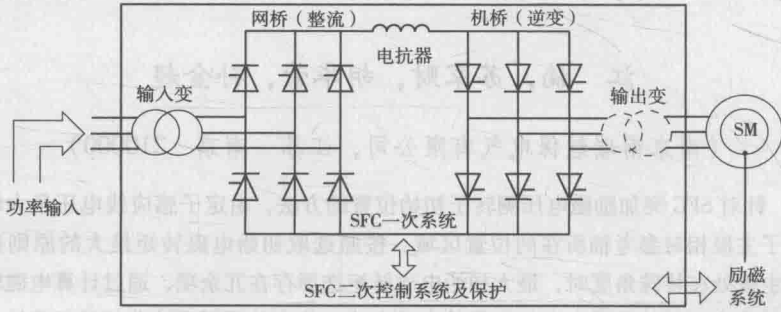


图1 SFC系统结构

SFC系统负责将作为同步电动机运行的电机，由静止拖动到同步转速，实现无冲击并网。SFC根据电机转子位置或机端电压信息，以频率逐渐升高的交流电压加到电机定子上，产生超前于转子磁场的定子旋转磁场，通过该磁场与转子磁场的相互作用，将电机转子加速到同步转速，再由同期装置实现机组并网<sup>[8]</sup>。

抽蓄电站机组水泵工况启动一般过程为：定子通流前加入励磁电流，检测静止状态下转子初始位置，经过一段时间后，变频器解锁，按其判定的转子位置首先给能够产生最大加速电磁转矩的两相定子绕组通流，当电机开始转动后，即在机组端中产生出与其转速相对应的三相交变电压，在电压过零时刻，自动产生逆变桥的换相信号，使定子电流从已导通的两相绕组转换到另外两个绕组上，以保证电机能继续得到正向加速电磁转矩。发电电动机组的电机在变频启动过程中，类似一台直流电机，三相定子绕组中任一时刻只有两相有电流流过，其中一相绕组电流为流入，另一相绕组电流为流出，两相绕组的定子磁势与转子磁势相互作用形成加速力矩以保证产生最大的正向启动加速电磁转矩。

## 1.2 磁动势分析

SFC逆变器部分与电机各相绕组的连接示意图见图2。根据逆变桥的工作原理，在任何时刻，晶闸管只有两个桥臂能导通，且分别属于共阳极组和共阴极组，从而保证电流的通路且不短路。这样逆变桥一共只有6种导通关系，分别是A+B-、A+C-、B+C-、B+A-、C+A-、C+B-，因此SFC逆变桥每隔60°电角度就需要换相一次。不考虑换相期间晶闸管关断时间和换相重叠角的影响时，SFC启动时三相绕组中电流为周期性方波电流。假设转子启动前处于图2所示区域（以A相绕组轴线作为空间位置起点），当通有励磁电流时则形成转子磁动势 $\vec{F}_r$ ，若逆变桥电流从A相绕组进入，而从B相绕组流出，即导通A+B-，形成定子合成磁动势 $\vec{F}_{A+B-}$ ，根据所示的定子与转子的磁动势相对位置关系，发电电动机通过定转子磁场的相互作用开始沿逆时针方向旋转。

将6种逆变桥晶闸管导通关系所得的合成磁动势表示在图3中，并且得到了空间上的6个区域I~VI。系统一般只检测定子绕组的三相线电压，所以将A相绕组和B相绕组虚拟合成为AB绕组（BC和CA绕组类似），以方便下文的分析。

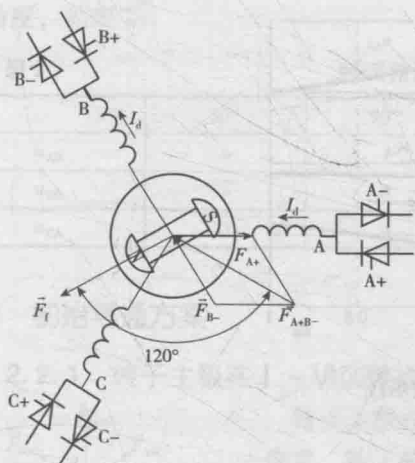


图2 同步电机与逆变桥连接及磁动势示意图

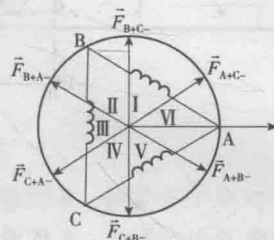


图3 不同导通方案的定子合成磁动势示意图

### 1.3 电磁转矩

定子磁动势与转子磁动势相对位置是产生驱动电磁转矩的基础。定子、转子磁动势在空间上保持一定的夹角  $\delta$ ，将产生电磁转矩以驱动电机旋转。定子两相输入电流合成磁动势  $F_d$ ，转子励磁电流生成磁动势  $F_f$ ，定转子相互作用即可产生电磁转矩  $T_e$ ，电磁转矩公式为

$$T_e = C_m F_d F_f \sin \delta \quad (1)$$

由式 (1) 可知，只要满足  $\delta = 0^\circ \sim 180^\circ$ ，正向电磁转矩就能拖动电机旋转，且当定子、转子磁动势成  $90^\circ$  夹角时，电磁转矩最大。当机组启动时由于静摩擦特性，需要较大的力矩才能使转子获得一定加速度，所以当确定转子初始位置后必须合理选择初始导通方案。

## 2 转子初始位置检测

### 2.1 转子初始位置检测方法

SFC 启动前，在电机励磁绕组中加入阶跃的励磁电压见图 4 (a)，此励磁电压作用于励磁绕组将会产生一个逐渐升高的励磁电流，见图 4 (b)，上升的励磁电流产生逐渐增加的转子磁链，尽管转子没有旋转，电机定子绕组磁通也产生变化，在电机的定子绕组上仍能够感应出电势，见图 5。由于转子位置与三相绕组轴线的相对位置不同，三相绕组的感应电势也将不等，定子绕组轴线越接近励磁绕组轴线，则此绕组感应出的电势峰值也就越高，反之则低。

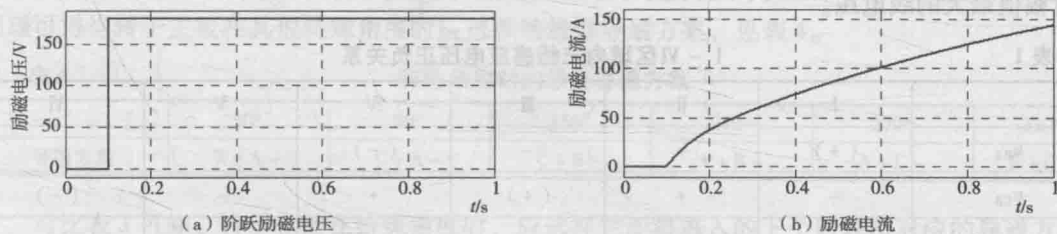


图4 阶跃励磁电压及励磁电流波形图

利用线电压可以进行转子位置计算，即

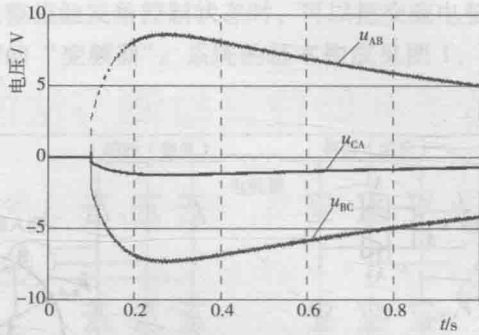


图5 三相感应电压波形图

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{3}u_{BC}}{u_{CA} - u_{AB}} \quad (2)$$

式中： $\theta$ 为转子主极与A相绕组轴线的角度，( $^{\circ}$ )。

也可以将感应线电动势进行 Clark 变换，得到静止坐标系下的两相线电压后再对线电压积分求得两相磁链分量，反正切求解即可得转子初始位置，计算方法为

$$\begin{cases} \psi_{\alpha} = \int u_{\alpha} dt \\ \psi_{\beta} = \int u_{\beta} dt \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \frac{\psi_{\beta}}{\psi_{\alpha}} \quad (4)$$

式中： $u_{\alpha}$ 、 $u_{\beta}$ 为 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴坐标系下的定子感应电压； $\psi_{\alpha}$ 、 $\psi_{\beta}$ 为 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴坐标系下的定子磁链。

以上两种方法都直接利用感应线电动势的瞬时值进行计算，但在实际工程中，感应线电动势仅有电压传感器量程范围的2%左右，且信噪比很低，不容易精确测量。同时采样回路中存在测量误差、随机干扰和直流偏置，导致求磁链的积分算法中出现饱和现象。这些都会给转子位置计算产生很大影响。同时，检测转子初始位置是为了确定初始导通方案，而初始导通可控硅只有6种选择方案(AB、BA、AC、CA、BC、CB)，所以并不需要计算准确的角度，只需要确定与6种初始导通方案对应的6个区域即可。下面介绍利用三相感应线电压中峰值最大的线电压的正负来确定转子主极所对应的空间区域的方法。

当转子主极位于图3所示IV区域时，由电磁感应原理可知，三相线电动势的正负见表1，且通过虚拟AB绕组的有效磁通量最多，在此区域内， $u_{BA}$ 峰值时幅值最大。用同样的方法可得其他5块区域内三相线电压中最大幅值的线电压的正负关系见表1，表中带括号的即为对应区域内峰值时幅值最大的线电压。

表1 I ~ VI区域内三相感应电压正负关系

	I	II	III	IV	V	VI
$u_{BA}$	(+)	+	-	(-)	-	+
$u_{CB}$	-	+	(+)	+	-	(-)
$u_{AC}$	-	(-)	-	+	(+)	+

但是当转子主极与某个定子合成磁动势同向时，会出现两个线电压峰值相同，但正负相反，另外一相接近于零。同样利用电磁感应的方向准则可以根据三相感应电动势正负关系得到6个特

殊角度, 见表 2。

表 2 特殊角度时三相感应电压正负关系

	30°	90°	150°	210°	270°	330°
$u_{AB}$	+	+	0	-	-	0
$u_{BC}$	-	0	+	+	0	-
$u_{CA}$	0	-	-	0	+	+

## 2.2 初始导通方案

### 2.2.1 转子主极在 I ~ VI 区域内时

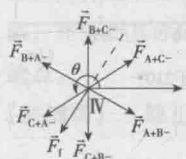


图 6 转子主极在区域磁动势示意图

转子主极在区域磁动势示意图见图 6。假设转子主极在区域 IV 的某一位置, 转子磁动势与参考轴的夹角为  $\theta$ , 为了产生正向电磁转矩, 定子磁动势与转子磁动势的夹角需在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间, 所以导通方案只能在  $A+C-$ 、 $A+B-$  和  $C+B-$  内选择。又根据式 (1), 夹角越接近  $90^\circ$ , 电磁转矩越大, 转子获得的加速度越大, 所以选择导通方案  $A+B-$ , 即电流从 A 相流入再从 B 相流出。同理可得, 在另外 5 个区域内的最佳导通方案, 见表 3。

表 3 区域内导通方案

	I	II	III	IV	V	VI
导通方案	$B+A-$	$C+A-$	$C+B-$	$A+B-$	$A+C-$	$B+C-$

结合图 6 所示三相虚拟绕组的空间位置及表 3, 可得导通方案: 转子静止时通入阶跃励磁电压, 给产生感应电压最大的那两相通电流。

### 2.2.2 转子主极在特殊角度时

当转子主极在某个特殊角度例如  $210^\circ$ 。则转子磁动势与定子磁动势重合, 见图 7, 此时按照能产生最大初始转矩的原则来选择定子导通方案,  $A+B-$  和  $C+B-$  均符合要求。

假设转子在正向电磁转矩的作用下逆时针转动小角度, 根据电磁转矩的计算公式, 此时  $A+B-$  导通方案的电磁转矩在逐渐增大, 即  $dT_e/dt > 0$ , 而  $C+B-$  导通方案的电磁转矩在逐渐减小, 即  $dT_e/dt < 0$ 。虽然两种导通方案的初始力矩一样, 但为了使转子能够持续获得较大的加速度, 应该选择电磁力矩变化率为正的导通方案, 即  $A+B-$ 。同理可得当转子主极在其他特殊角度时应选择的最佳导通方案, 见表 4。

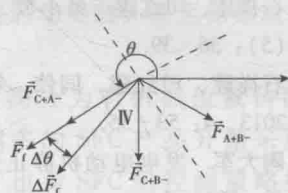


图 7 转子主极在特殊角度磁动势示意图

表 4 特殊角度时的最佳导通方案

	30°	90°	150°	210°	270°	330°
导通方案	$B+A-$	$C+A-$	$C+B-$	$A+B-$	$A+C-$	$B+C-$

对比表 3 可知, 转子主极在特殊角度时, 应选择它即将进入的下个区域所对应的导通方案。

## 3 仿真验证

搭建 matlab/simlink 仿真模型, 同步电机采用 matlab 自带的典型 550MVA、24kV、3000r/min

的参数,原动机无功率输入,转子角度固定。在0.1s 通入阶跃的励磁电压,图8(a)和图8(b)分别是转子位于225°即区域Ⅳ和210°时的三相感应电动势。从图中可以看出,三相感应电动势的正负关系与表3和表4完全一致,验证了转子初始位置检测的正确性。

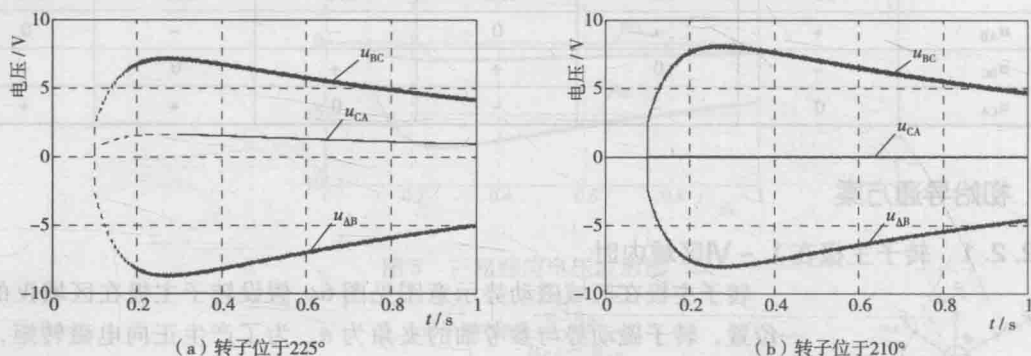


图8 转子在不同角度时的三相感应电压

## 4 结语

利用三相绕组定子感应电压峰值的大小和正负关系来检测转子初始位置的方法简洁明了,避免了电压检测法和磁通检测法中直接求反正切函数或者积分环节带来的复杂数学运算,同时针对转子主极在特殊角度时,传统的初始电磁力矩最大来选择导通方案存在冗余选择,提出按电磁力矩变化率的正负关系来选择最合适的导通方案。

### 参考文献:

- [1] 闫伟,石祥建,龚翔峰,等. 抽水蓄能电站 SFC 系统研制及应用 [C]. 第十八届中国水电设备学术讨论会论文集. 2011: 4.
- [2] 石祥建,司红建,吴小放,等. 静止变频器系统分数次谐波分析 [J]. 江苏电机工程, 2012, 31(5): 36-39.
- [3] 石祥建,司红建,闫伟,等. 静止变频器系统变压器短路阻抗的算法研究 [J]. 江苏电机工程, 2013, 4: 53-55.
- [4] 陶大军. 发电电动机静止变频器起动强迫换流阶段若干问题研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [5] 郭国伟. 抽水蓄能机组静止变频起动控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [6] 南京南瑞继保电气有限公司, 南京南瑞继保工程技术有限公司. 一种同步电机转子静止位置检测方法中国, CN201010539868. 0 [P]. 2012.
- [7] 田淳,胡育文. 一种新颖的电磁式同步电机力矩控制方案 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(2): 108-112.
- [8] PETERSSON T, FRANK K. Starting of Large Synchronous Motor Using Static Frequency Converter [J]. Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, 1972, PAS-91(1): 172-179.

### 作者简介:

江楠(1989—),男,湖北京山人,从事发电厂励磁及 SFC 工程调试工作。E-mail: jiangnan@nrec.com

苏家财(1986—),男,重庆江津人,从事发电厂励磁及 SFC 工程管理和调试工作。

胡华荣(1982—),男,湖北枝江人,从事发电厂励磁及 SFC 工程管理和调试工作。

孙金超(1988—),男,山东潍坊人,从事发电厂励磁及 SFC 工程调试工作。

# 同步电机转子静止电气位置检测方法概述

刘 腾, 闫 伟, 石祥建, 吴 龙

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**【摘 要】** 本文阐述了准确检测电机静止时转子初始位置对抽水蓄能电站变频启动机组的重要性, 并介绍了常见转子静止初始位置检测方法。针对无机械位置传感器的转子初始位置辨识策略, 在分析其原理的基础上, 本文着重研究了电压滤波方法和磁通计算方法, 对比了二者的优缺点。

**【关键词】** 静止变频器; 初始转子位置检测

## 0 引言

抽水蓄能电站发电电动机运行灵活、反应迅速, 可用于电力系统调峰、填谷、调频、调相、备用和黑启动, 是极具经济性的大规模储能设施。在抽水蓄能电站机组的水泵启动策略中, 变频启动因其对电网冲击小、速度快、可靠等特点, 成为水泵工况启动的优选启动方式。

静止变频器 (Static Frequency Converter, SFC) 是一种电流源型变频器, 有结构简洁、功率密度大、可靠性高等优点, 常用于大型抽水蓄能电站机组水泵运行的变频启动。准确检测电机的转子电气位置, 是 SFC 精确控制的基础。其中, 转子静止初始电气位置的检测尤为重要, 直接影响机组启动的成功与否。错误的转子初始位置判别, 会导致机组启动失败, 甚至初始反向转动。在 SFC 的某些应用场合, 这可能造成机组机械部件的损伤。

根据是否使用专用的转子位置检测装置, SFC 转子位置检测分为有机械位置传感器和无机械位置传感器两种。随着测控技术的不断发展, 越来越多的 SFC 产品开始采用后一种方式。这在减少用户维护工作量和降低产品成本的同时, 也对 SFC 的控制策略提出了更高的要求。无机械位置传感器的转子初始位置辨识, 是现代 SFC 的关键技术, 也是技术难点。

## 1 转子初始位置与初始触发

为了驱动静止的电机轴系按指定方向加速, SFC 施加给电机的定子电流需要产生 (在加速方向上) 超前转子磁场的定子磁场。电机的转子位置静止时具有随机性, 而 SFC 的机桥初始导通只有 6 种导通组合。通常, SFC 控制系统根据检测到的转子初始位置, 按照既定规则触发合适的晶闸管对, 以产生正向足够大的加速转矩。

SFC 初始触发示意图见图 1, 在电机启动前, 转子在  $\vec{\psi}_r$  所示的位置, 通过触发机桥的晶闸管 VT4 和 VT5, 建立定子磁场  $\vec{\psi}_s$ , 即可牵引转子按设定方向加速启动。若转子初始位置计算错误, 会导致 SFC 系统触发不恰当的机桥晶闸管, 引起初始启动转矩严重不足, 甚至反向转动, 引起电机启动失败, 比如触发 VT1 和 VT2。



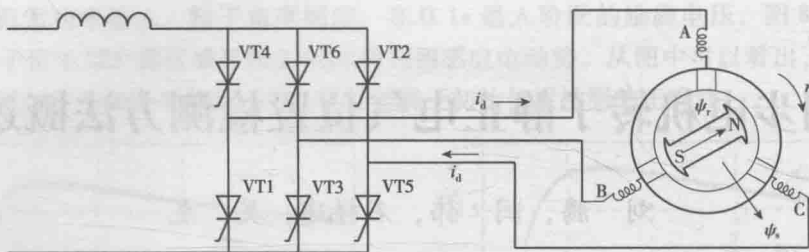


图1 SFC初始触发示意图

## 2 转子初始位置检测方法

### 2.1 机械位置传感器

在电机的轴上装设与大轴同步旋转的模拟转子磁极的齿盘，在支架上装有模拟三相定子绕组位置的三个传感器探头，三个电磁传感器按 $120^\circ$ 电角度分布。A、B、C三相定子绕组的磁极中心线与传感器感应的方波电压波形中心线相重合。转子每转过一个磁极位置传感器，接收一个幅值恒定脉宽为 $180^\circ$ 的方波电压。这些方波与转子磁场位置一致，用于反映发电机的实际转子位置<sup>[1]</sup>。采用机械位置传感器的电机，每次电机检修后，需要对机械位置传感器做校准试验。

### 2.2 无机机械位置传感器的检测原理

不同于上述方法，下面介绍依据电磁感应原理实现的转子初始位置软件辨识策略，基本原理为：机组启动前，励磁系统接收SFC的阶跃励磁电流指令，向转子绕组施加突变的励磁电流，变化的励磁电流会感应出定子电压。三相定子感应电压的相位、幅值与转子的初始位置有关，见图2。

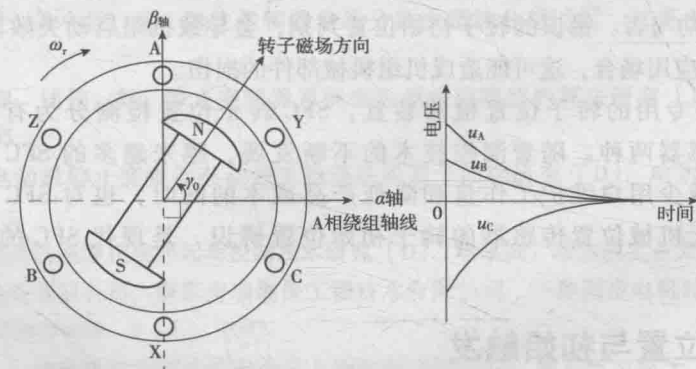


图2 初始转子位置检测原理示意图

考虑到SFC启动前电机定子开路，有

$$\begin{cases} \psi_A = (M_{sr}i_r + M_{sd}i_D) \cos(\omega_r t + \gamma_0) \\ \psi_B = (M_{sr}i_r + M_{sd}i_D) \cos(\omega_r t + \gamma_0 + 120^\circ) \\ \psi_C = (M_{sr}i_r + M_{sd}i_D) \cos(\omega_r t + \gamma_0 - 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\psi_A$ 、 $\psi_B$ 、 $\psi_C$ 为定子三相绕组的磁链； $M_{sr}$ 为定子绕组间互感； $M_{sd}$ 为定子绕组与D轴阻尼绕组间互感； $i_r$ 为转子电流； $i_D$ 为d轴阻尼绕组电流； $\gamma_0$ 为定子A相绕组轴线与转子轴线的初始夹角； $\omega_r$ 为转子电角转速。