

静止变频器在可逆式机组中的应用

陈湘匀, 王俊生

(广州蓄能水电厂, 广东 从化 510950)

摘要:介绍静止变频器(SFC)采用矢量控制技术的工作原理, 以及其硬件配置、软件组态、系统功能和特点, 分析 SFC 的电流断续换相运行和负载换相运行. 全数字大功率电流源型交-直-交变频启动装置在广州蓄能水电厂二期机组中的应用实践表明, SFC 故障率仅 0.96%, 提高了设备的控制性能和运行可靠性; 实际电机从静止拖动到并网仅需 240s, 保证了机组抽水工况的快速启动.

关键词:大型同步电动机; 静止变频器; 变频启动; 抽水蓄能电站

中图分类号:TV743

文献标识码:B

文章编号:1006-7647(2002)04-0052-04

广州蓄能水电厂装机 2400 MW, 其可逆式机组水泵工况涉及大型同步电动机的启动, 设计以静止变频器(SFC)启动为主, 机组背靠背启动为辅. 广州蓄能水电厂二期工程安装 4 台 300 MW 可逆式机组, SFC 采用 Siemens 公司的全数字大功率 SIMOVERT S 电流源型交-直-交变频调速装置, 恒磁调压/调频启动, 可连续逐台启动 4 台机组. SFC 和机组励磁系统采用数字式 Simadyn-D 控制系统.

1 同步电动机变频启动原理

电机变频启动时, 转子绕组通入励磁电流, 定子由 SFC 供电, 由定子频率控制转子转速. SFC 输出的频率在启动开始时调得很低, 然后逐步上升至额定值, 利用同步转矩的作用, 使电机的转速随变频器输出频率同步地升至额定值. Siemens 公司结合双反应理论和矢量控制理论, 忽略凸极式同步电动机 d, q 轴磁路不对称、转子阻尼绕组和磁化曲线的非线性等次要因素的影响, 将三相电机等效为直流电机进行控制^[1]. SFC 整套装置由功率单元、控制单元组成, 电机励磁单元为自并励可控硅静态励磁, 由机组励磁系统控制, SFC 的软、硬件配置及控制框图见图 1. SFC 主要技术参数为: 额定电压 18 kV, 额定功率 18 MW, 额定转速 500 r/min, 过载系数 1.3, 输出频率 0~52 Hz, 整流器额定触发角 26.3°, 逆变器额定触发角 141°.

2 SFC 的功率单元

SFC 的功率单元包括输入变压器、直流耦合电路、整流器和逆变器三部分. 输入变压器容量

16.8 kVA, 利用其二次侧三角形绕组隔离滤波, 减少整流器产生的谐波电压对电网的影响, 降低电网谐波含量.

直流耦合电路装设 2 个 26 mH 的平波电抗器, 用以抑制直流回路纹波, 改善逆变器晶体管的工作条件. SFC 输出侧电抗器的作用是防止逆变器换流时电流增长过快而损坏晶体管元件^[2].

SFC 的整流器和逆变器采用三相全控桥式电路(三相六拍). 整流器晶体管采用电源的交流电压换相, 120°导通型逆变器晶体管采用同步电动机的定子反电动势换相. 变频器每个桥臂由 12 个双极型晶体管 BJT 串联而成, 冗余配置, 单个晶体管的故障不影响变频器工作. 从控制单元到功率单元, 晶体管 BJT 的触发及检测信号采用光电耦合技术, 即采用光纤及光电转换器件进行传输. 晶体管水冷, 分外冷却和内冷却. 内冷却回路用去离子水循环直接冷却晶体管, 去离子水有再生装置, 用碳化硅作吸附材料. 取自消防环管的外冷却水用于冷却去离子水.

3 SFC 控制单元

SFC 控制单元采用 Siemens 公司 20 世纪 90 年代初研制开发的具有国际先进水平的可自由配置模板式硬件, 软件编程采用图形化的全数字多微处理器控制系统 Simadyn-D, 见图 1.

3.1 硬件

硬件主要有处理器板、通讯板、通讯缓冲板、触发器板、诊断板、光电输入输出板、I/O 板、操作面板 OPI 等. 所有硬件均以插入卡的形式安装在标准机

作者简介: 陈湘匀(1973—), 男, 湖南湘潭人, 学士, 工程师, 从事抽水蓄能电站运行管理工作.

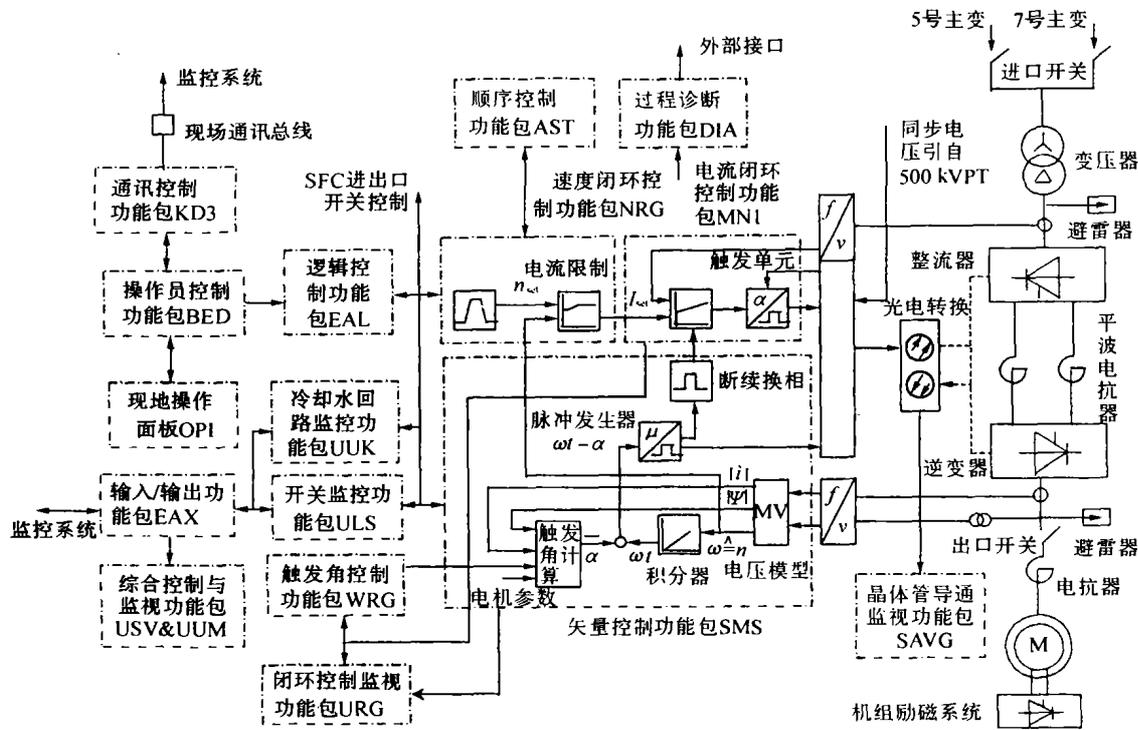


图1 广州蓄能水电厂二期工程 SFC 软、硬件配置及控制框图

架上,共有 6 个处理器板,每个处理器板处理不同任务,使控制系统具有强大的运算功能.6 个处理器之间及与外设控制板之间通过局部总线和通讯总线进行内部高速数据通讯,而 Simadyn-D 与监控系统之间通过 I/O 板和通讯板等硬件模板实现内/外部高速数据通讯和信息交换。

3.2 软件组态及功能

Simadyn-D 系统是 Siemens 公司在 Window 3.1 平台上开发的数字过程控制系统,采用全图形式的编程语言 STRUC G 进行软件设计开发.功能块是软件设计的最小组态单位,包括逻辑块、算术块、诊断块、信号转换块、I/O 块和通讯块等.一个功能块即一个子程序,相当于硬件设计中的集成电路.只需要用鼠标从图形库中选择预先编制好的功能块,将各功能块相互连接并设定参数,即构成实现一定的系统控制功能的软件功能包,主要包括逻辑控制、顺序控制、操作员控制、通讯控制、开环或闭环控制、矢量控制及监视等软件功能包,而各软件功能包的有机组合构成了用户程序.用户程序按功能类型均衡配置各软件功能包,分别由 6 个微处理器进行实时处理,即所谓的多微处理器、多任务并行处理技术^[3],从而实现对 SFC 的各种高速开环或闭环控制、运算、检测、监视、报警及诊断等功能。

a. 开环或闭环控制. 整流器采用速度和电流双闭环控制,逆变器采用矢量控制技术.SFC 输出测量采用霍尔效应变换器型电压互感器,综合补偿计

算后产生同步电动机电压模型 MV 的磁通矢量,实现对电压模型的矢量控制,使逆变器每次都选择在定子与转子磁场矢量互成 90° 时进行换相^[1].速度闭环控制功能包 NRG 实现对整流器速度环的闭环控制及监视;电流闭环控制功能包 MN1 实现对整流器电流的闭环控制及触发单元的监视;矢量控制功能包 SMS 实现对逆变器负载换相的矢量控制及监视,低速运行时断续换相触发脉冲的控制及监视;过程诊断功能包 DIA 实现对 SFC 相关过程控制量及信号的实时诊断显示,即将各过程控制量及实时信号存储在 DIA 的跟踪存储器中,通过 D/A 转换器随时输出,供故障诊断分析用。

b. 供电控制. USV/UUM/ULS/UGR 等监视功能包实现对 SFC 系统中主要功率器件如 SFC 进出口开关、功率单元、同步电动机等的综合控制和监视;逻辑控制功能包 EAL 综合各监视功能包、顺序控制功能包 AST 的控制信号、操作员控制功能包 BED 和通讯控制功能包 KD3 的命令字,实现对 SFC 主电路和辅助电路分闸或合闸的顺序控制;操作员控制功能包 BED 实现对 SFC 的现地控制,并组态操作面板 OPI 的输入及显示;通讯控制功能包 KD3 与通讯板相配合,实现 SFC 与监控系统的联网通讯;冷却水控制功能包 UUK 控制晶体管 BJT 的内外冷却水。

4 SFC 的运行

a. 转子位置检测和初始定位.SFC 采用电气测

角和测速方法. 起动前投入机组励磁, 在转子磁场逐步建立过程中, 定子绕组感应出三相电动势, 电压模型 MV 对电动势积分就可得气隙磁链 Ψ 的大小和转子位置角^[1]. 计算时间的密切配合, 保证励磁与 SFC 检测程序之间严密同步, 这也是整个起动过程中最为关键的一步. 起动期间, Simadyn-D 控制保持电机磁通恒定, 实现恒转矩调速. 由于是恒磁通控制, 通过对定子电压测量, 即可计算出转子位置角.

b. 断续换相运行. 确定转子初始位置后, 按照矢量控制理论中力矩星形分布情况, SFC 判断同步电动机起动时刻能产生最大正加速力矩的两相定子电流, 触发晶体管导通, 给对应的两相定子绕组通电, 产生一个超前转子磁场的同步定子磁场, 两个磁场相互作用, 使转子获得最大电磁转矩^[1], 转子开始转动, 由整流器控制 SFC 输出电流的幅值, 由逆变器控制 SFC 输出电流的频率. 为保证起动后加速阶段电磁转矩的恒定, 转子转动的同时改变输入定子电流的频率, 使转子磁场与定子磁场同步旋转, 而且在空间矢量上, 保持定子磁势超前转子磁势的夹角不变.

起动初期和低速运行时定子产生的反电动势不足以关断逆变器的晶体管, 此时采用电流断续法进行换相, 逆变器以逆变超前角 $\beta = 0^\circ$ 运行. 需要换相时, 暂时强迫关断晶体管, 闭锁整流器和逆变器的输出, 再给换相后应该导通的晶体管加上触发脉冲使其导通, 从而实现换相. 此期间 SFC 输出的电流是断续的^[2], 输出电流维持额定值的 80%.

c. 负载换相运行. 当转速大于额定值的 7% 时, 同步电动机可产生足够大的反电动势, 关断逆变器晶体管进行换相, 进入负载换相阶段. 在转速由额定值的 7% 升至 25% 期间, SFC 的输出电流由额定值的 80% 升至额定值, 逆变超前角 $\beta = 60^\circ$; 之后 SFC 输出额定值给转子加速, 逆变超前角 $\beta = 50^\circ$. 起动过程中相关波形见图 2^[2].

d. 同步并网阶段. 达到 96% 额定转速时, 起动机组同期装置进入自动整步微调阶段. 同期装置根据频率差 Δf , 产生一个附加转速微调信号, 自动调

整 SFC 输出电流, 对转速做微调. 同期装置同时发出命令给励磁系统调节励磁电流, 使机端电压与电网电压平衡. 并网后整流器的晶体管即运行于 120° 全逆变状态, 其输出电流迅速降为零, 关闭晶体管, 然后闭锁整流器和逆变器的全部触发脉冲, SFC 装置退出, 完成整个起动过程.

5 广州蓄能水电厂二期工程 SFC 的特点

a. SFC 的控制系统借助图形化编程软件可以很容易完成大型同步电动机变频起动的控制, 由于编程软件是面向应用的, 具有简单、易掌握、省时、不易出错等特点, 大大提高了编程效率.

b. 由于利用了先进的硬件模块和系统总线、高效率的多微处理器并行处理技术、高速的操作系统软件, 并应用矢量控制技术, 使全数字式 Simadyn-D 控制系统能够以很高的动态性能完成极复杂的控制.

c. 控制系统 Simadyn-D 的硬件和软件是模块式的, 可以根据系统的需要扩展, 实现控制功能修改、完善和扩充.

d. SFC 全部的控制、监视功能及保护功能均由软件实现, 从而减小硬件故障隐患点. 此外, 由于从控制单元到功率单元的触发及检测信号采用光电耦合技术, 因此增强抗干扰能力, 确保触发的正确性和可靠性.

e. 应用标准化和专业化集成技术, 大大简化了硬件结构, 因此在 Simadyn-D 内部只需要几种不同类型的硬件模板即可实现 SFC 的全部控制功能.

f. 由于 SFC 的控制单元采用全数字控制系统 Simadyn-D, 具有丰富、全面的控制、监视及故障诊断功能, 因此大大减少了调试、维护及检修所需时间.

g. SFC 采用电气测角和测速, 从根本上消除了转子振荡和失步的隐患, 由电压模型计算出转子位置和转速, 取消测量转子转速用的脉冲信号发生器, 减少了硬件设备, 相应减少了故障概率.

h. SFC 采用串联 12 个双极型晶体管 BJT 分压, 不用变压器降压. 原设计 SFC 采用 L-C 滤波装置, 但实际调试过程中曾几次因同步信号故障而导致 SFC

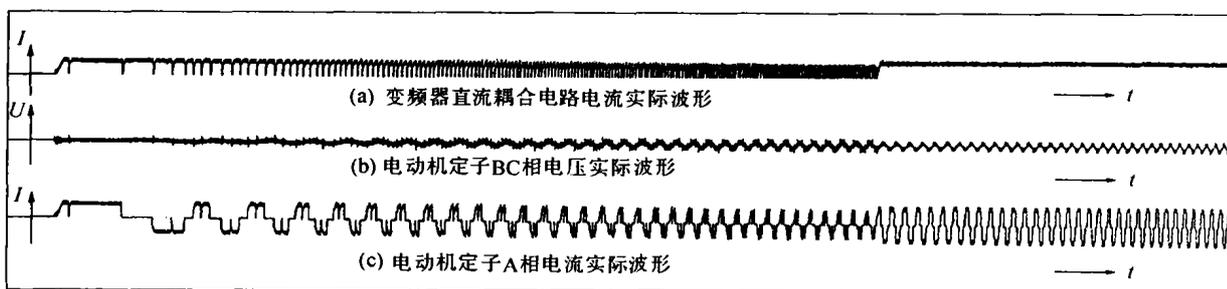


图 2 电流断续换相运行和自然换相运行初期相关电压电流波形

启动失败, L-C 滤波装置与其他相关电气设备的参数不匹配. 经反复试验、测试和研究, 增设隔离变压器取代 L-C 滤波装置, 改造后抽水工况运行比较理想.

6 结 语

2000 年广州蓄能水电厂二期工程 SFC 共启动 2068 次, 平均启动约 6 次/d, 其中因 SFC 本身故障导致启动不成功的仅有 20 次, SFC 故障率仅 0.96%, 其可靠性较高. 实际电机从静止拖动到并网仅需 240 s. 实践表明, 全数字大功率变频调速装置

作为大型同步电动机的启动装置是成功的.

参考文献:

- [1] 李志民, 张遇杰. 电气自动化新技术丛书. 同步电动机调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 邱景安, 梁见诚. 电动发电机. 抽水蓄能电站[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. 221~226.
- [3] 穆学仁. 西门子 SIMADYN D 系统[J]. 电气传动, 2000(1): 63~65.

(收稿日期: 2001-04-18 编辑: 张志琴)

(上接第 45 页) 防止混凝土出现温度裂缝; 考虑防水、排水等措施. 如果难以避免裂缝, 应尽量减小裂缝宽度. 为减少冻融循环次数, 防止水分渗入裂缝内部, 可以在水池表面涂刷白色防水涂料、石灰浆和白水泥浆等进行封闭覆盖.

4.2 抗震措施

在地震烈度较高的地区, 宜优先采用地下式和半地下式软底水池. 对于地上式软底水池, 可以在水池周围填土压实, 填筑高度宜为水池高度的 $1/3 \sim 1/2$, 池周填土顶宽视水池大小而定, 一般取 $1 \sim 3$ m, 填土外坡以稳定为准, 坡比通常取 $1:0.75 \sim 1:1.5$.

除上述措施外, 也可以采取增加池壁厚度、加大配筋量或者设置抗震扶壁、抗震剪力墙、抗震拉索等结构措施.

5 软底水池的适用范围及耐久性

5.1 适用范围

软底水池刚柔相济, 对地基的适应能力强, 对地基承载力的要求低, 既适用于缺水山区较陡的山坡、沟谷地形, 也适用于平原区承载力较弱的软土地基. 地基允许承载力最低可放宽至 39.23 kN/m^2 , 而不用进行地基处理.

软底水池所用的聚乙烯土工防渗膜, 适应变形能力强, 使用温度范围大, 可在 $-50 \sim 60^\circ\text{C}$ 环境下使用, 抗冻温度达 -60°C . 因此, 无论在我国北方、南方还是东部、西部均可兴建软底水池.

聚乙烯土工防渗膜耐强酸强碱, 耐腐蚀性能强, 无毒性, 造价低. 目前, $0.15 \sim 0.2 \text{ mm}$ 厚的聚乙烯土工防渗膜的价格约在 2 元/m^2 左右. 因此, 软底水池既可用于人畜饮水, 又可用于农业灌溉, 在缺水地区的水利建设中可广泛应用.

5.2 耐久性

根据有关机构对土工防渗膜所做的抗老化试验, 当采用埋填施工措施时, 聚乙烯土工防渗膜的使

用寿命可达 $30 \sim 50$ a, 有些性能优良的土工防渗膜, 其使用寿命甚至可以达到 100 a. 因此, 软底水池的耐久性良好, 使用寿命有可靠保证.

6 软底水池的使用管理

地上式软底水池底部设有进出水管口, 用水时, 可以打开闸阀直接放水, 若水池与田间节水灌溉系统相连接, 可以实现自压输水灌溉. 地上式水池池壁外侧宜每年涂刷石灰浆或白色防水涂料 1 次, 在冬季要注意闸阀和输水管道防冻. 地下式和半地下式水池用水时, 应注意不要为了集水而随意挖掘池底, 以免损伤土工防渗膜, 造成水池漏水. 当水池发生淤积, 淤泥达到一定厚度时, 要及时进行清淤.

设计合理、施工良好的软底水池一般不会发生破坏, 日常管理非常简单, 只要注意冬季防冻、夏季防洪防冲、蓄水期加强监控, 以及不发生人为破坏, 即可保证水池经久耐用, 长期发挥供水效益.

7 软底水池的经济性和发展前景

在缺水山区修建软底水池可减少土石方开挖量 $40\% \sim 80\%$, 据工程预算和调查统计, 软底水池比刚性水池可以节省工程投资 $30\% \sim 40\%$. 在平原区软土地基上兴建软底水池, 可以节省大量基础处理费用. 节省的投资幅度不亚于缺水山区. 兴建宽浅式水池比兴建窄深式水池节省. 如果兴建地上式钢筋混凝土和预应力混凝土圆形软底水池, 投资节省幅度更大, 而且还能实现自压输水灌溉, 节省运行费用.

经济实用的廉价水源工程——软底水池, 既是缺水山区的“大水缸”, 也是缺水山区潜在的粮仓和果品库. 这种小(微)型蓄水设施非常适合山丘区地形复杂多变的特点和集雨工程建设, 其经济效益、社会效益和生态效益都非常显著, 具有广阔的推广应用前景.

(收稿日期: 2001-06-28 编辑: 马敏峰)