

ICS 25.040.01

CCS K 62

# 团 体 标 准

T/DZJN 409—2025

## 中高压电机变频切换工频控制系统及控制 方法

Control System and Control Method for Synchronous Transfer of Medium  
Voltage Motor

2025-04-08 发布

2025-04-10 实施

中国电子节能技术协会 发布



## 目 次

前言	II
1 适用范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 技术要求	2
4.1 系统拓扑	2
4.2 电气安全要求与规格	3
4.3 切换条件	5
4.4 过程监测	5
4.5 切换控制过程	5
5 主要技术点	7
5.1 矢量控制	7
5.2 磁通与速度环控制	7
5.3 电流调节器	8
5.4 锁相环控制	8
5.5 转矩限幅	8
5.6 转速追踪启动	8
6 切换验收方法	8
7 安全措施	8
8 维护和记录	9
9 异常情况处理	9

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由苏州汇川技术有限公司提出。

本文件由中国电子节能技术协会归口。

本文件起草单位：苏州汇川技术有限公司、佳木斯电机股份有限公司、上海辛格林纳新时达电机有限公司、国电南瑞科技股份有限公司、蔚来动力科技（合肥）有限公司、北京绿碳循环信息技术咨询有限公司、中国电子节能技术协会工业电气传动节能专业委员会。

本文件主要起草人：袁华佑、陈实、王军、赵倩、李兴鹤、曹素环、胡静、简优宗、王凯、毕路、翁翔羿、田国雄、李成功、冯汉聪。

# 中高压电机变频切换工频控制系统及控制方法

## 1 适用范围

本文件规定了使用中高压变频器驱动中高压电机系统，从变频模式无扰切换到工频模式的技术要求、控制方法、验收方法、保护策略、操作流程等方面的技术要求。在工业生产中，将中高压电机从变频控制无扰切换到工频控制是一个重要的工艺控制过程。本标准旨在确保切换过程的平稳性、安全性和可靠性，以保护设备及人员的安全，并维持电力系统的连续性、稳定性。

本文件适用于额定输入电压在 1kV~35kV、额定容量在 250kVA 以上的中高压变频器。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不标注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件：

GB 12668.1 电机驱动系统和电源装置 第 1 部分：通用要求

GB 12668.2 电机驱动系统和电源装置 第 2 部分：变频器

GB 12668.3 调速电气传动系统 第 3 部分：电磁兼容性要求及其特定的试验方法

GB 50171 电气装置安装工程 盘、柜及二次回路接线施工及验收规范

GB 50150 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准

DL/T 593 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求

DL/T 1156 电力行业通用技术条件：电力电子器件

DL/T 5037 电力系统运行技术规程

IEC 60034-25 Rotating electrical machines - Part 25: AC electrical machines used in power drive systems

IEC 61000-4-30 Electromagnetic compatibility(EMC)

IEC 61800-5-1 Adjustable speed electrical power drive system - Part 5-1: Safety requirements-Electrical, thermal and energy

IEC 61800-8 Adjustable speed electrical power drive system - Part 8: Specification of voltage on the power interface

IEEE 519 IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**中高压变频器 medium-voltage AC drive**

用于控制中高压电机转速和电力输出频率的设备。

### 3.2

## T/DZJN 409—2025

### 工频运行 **under mains frequency control**

电机运行在工频电源供电状态。

### 3.3

### 变频运行 **in AC drive control**

电机运行在变频器供电状态。

### 3.4

### 上切换就绪 **up transfer ready**

中高压变频器驱动中高压电机在运行状态，并且具备将负载带到电网电压、电网频率的输出能力。

### 3.5

### 上切换 **up transfer**

中高压变频器驱动中高压电机从变频模式切换到工频模式。

### 3.6

### 环流抑制电抗器 **reactor**

该电抗可作为变频切换工频控制的选配件，选配情况下可减少切换瞬间电机端的冲击电流。

## 4 技术要求

### 4.1 系统拓扑

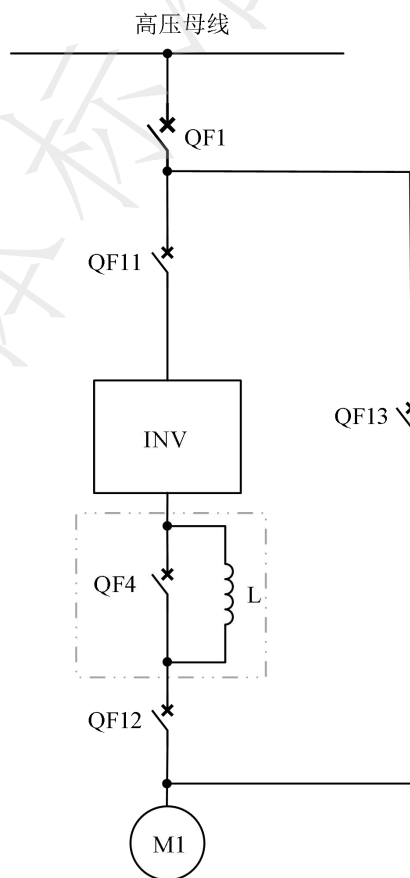


图1 一台高压变频器驱动一台中高压电机切换控制系统拓扑图

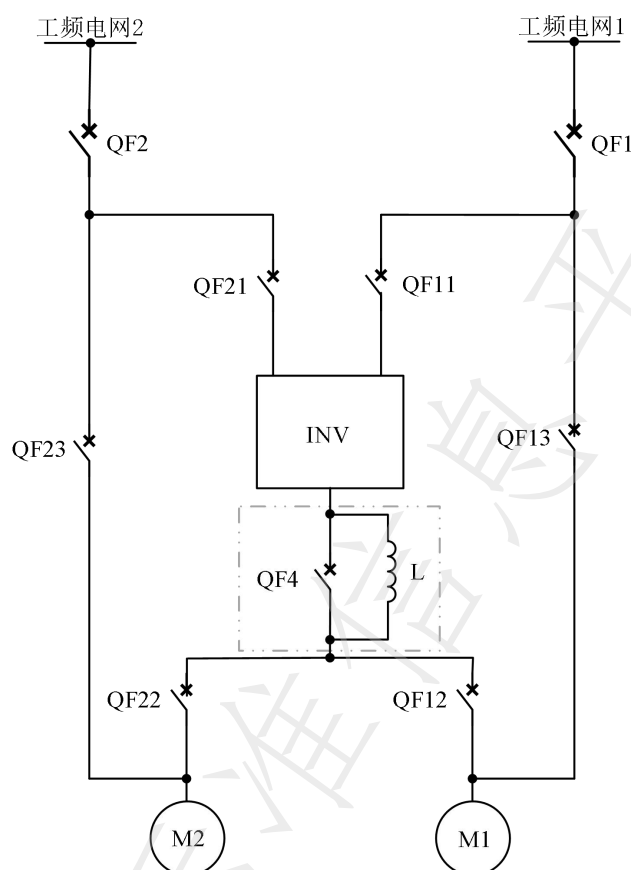


图2 一台高压变频器驱动多台中高压电机切换控制系统拓扑图

如图1、图2所示，INV为中高压变频器，M为中高压电机，其他部件简介如下（器件标号仅用于区分器件，不强制要求）：

- 高压开关部件：QF1/QF2-工、变频支路的前级断路器，用于保护后级短路、电网失压等异常。
- 切换部件：包含QF<sub>x1</sub>-变频器进线断路器，QF<sub>x2</sub>-变频断路器，QF<sub>x3</sub>-工频断路器，其中QF<sub>x1</sub>进线断路器可以缺省不配置，配置时可提高变频器检修时的安全性。x代表多电机，不同的电机对应不同的切换柜。
- 环流抑制部件：QF4-旁路抑制环流电抗器断路器，L为抑制环流电抗器。环流抑制柜属于选配件，不强制要求配置，故在拓扑图中用虚框框出。

## 4.2 电气安全要求与规格

### 4.2.1 切换开关的联锁要求

变频器1号切换柜的进线断路器QF1和x号切换柜的进线断路器QF<sub>x1</sub>必须互锁，避免多路不同源的工频电源同时接入高压变频器，造成电网短路和高压变频器故障跳闸。

变频器进线断路器QF<sub>x1</sub>和变频断路器QF<sub>x2</sub>在电气设计上应满足安全联锁，保证进线断路器QF<sub>x1</sub>合闸后，变频断路器QF<sub>x2</sub>才能闭合。

变频断路器QF<sub>x2</sub>和工频断路器QF<sub>x3</sub>在电气设计上有条件互锁，避免工、变频异常动作导致电机工频直起。

选配环流抑制柜后，旁路抑制环流电抗器断路器QF4在进行上切换时需保持断开状态，保证在切换过程中环流抑制电抗器接入主功率回路。由于抑制环流电抗器串入主功率回路，该电抗器的选型和

散热需要根据高压变频器的容量进行工程化设计，做好过热保护避免引发安全事故。

#### 4.2.2 冲击电流的影响因素

正弦交流电的计算公式可以根据欧姆定律和正弦函数表示。对于正弦交流电，电压可表示为时间的函数如公式（1），电流可表示为时间的函数如公式（2）。

$$V(t) = V_m \times \sin(\omega t + \varphi) \dots\dots\dots (1)$$

$$I(t) = I_m \times \sin \omega t \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$V(t)$  ——时间 $t$ 时刻的电压值；

$V_m$  ——电压的峰值（幅值），表示电压的最大值；

$\omega$  ——单位时间内的角度变化量，单位为弧度/秒；

$t$  ——时间；

$\varphi$  ——电压相对于电流的相位差，单位为弧度；

$I(t)$  ——时间 $t$ 时刻的电流值；

$I_m$  ——电流的峰值（幅值），表示电流的最大值。

由上可知，当角频率 $\omega$ 计算存在一定偏差时，上切换瞬间变频支路和工频支路电流瞬时值存在正比例的线性关系，即角频率 $\omega$ 偏差越大，瞬时切换电流冲击就越大， $t_0$ 时刻冲击电流 $I_{peak}$ 等效公式可近似表示为公式（3）：

$$I_{peak} = \frac{2V_m}{Z} \cos \frac{(\omega_{工频} + \omega_{变频}) \times t_0}{2} \sin \frac{(\omega_{工频} - \omega_{变频}) \times t_0}{2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$I_{peak}$  —— $t_0$ 时刻施加在电机上的电流值；

$V_m$  ——电压的峰值（幅值），表示电压的最大值；

$\omega_{工频}$  ——单位时间内的工频支路角度变化量，单位为弧度/秒；

$\omega_{变频}$  ——单位时间内的变频支路角度变化量，单位为弧度/秒。

当相位角 $\varphi$ 计算存在一定偏差时，会导致输出电压与工频电网电压存在相位差，忽略高压电机等效阻抗的变化，上切换瞬间变频支路和工频支路电流瞬时值存在正比例的线性关系，即相位角 $\varphi$ 偏差越大，瞬时切换电流冲击就越大， $t_0$ 时刻冲击电流 $I_{peak}$ 等效公式可近似表示为公式（4）：

$$I_{peak} = \frac{2V_m}{Z} \cos \frac{(\omega_{工频} + \omega_{变频}) \times t_0 + \varphi_{工频} + \varphi_{变频}}{2} \sin \frac{(\omega_{工频} - \omega_{变频}) \times t_0 + \varphi_{工频} - \varphi_{变频}}{2} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$I_{peak}$  —— $t_0$ 时刻施加在电机上的电流值；

$V_m$  ——电压的峰值（幅值），表示电压的最大值；

$\omega_{工频}$  ——单位时间内的工频支路角度变化量，单位为弧度/秒；

$\omega_{变频}$  ——单位时间内的变频支路角度变化量，单位为弧度/秒；

$\varphi_{工频}$  ——工频支路电压相对于电流的相位差，单位为弧度；

$\varphi_{变频}$  ——变频支路电压相对于电流的相位差，单位为弧度。

当电网电压幅值和变频输出电压幅值存在一定偏差时，该幅值差异影响会导致上切换瞬间变频支路和工频支路电流瞬时值存在正比例的线性关系，忽略高压电机等效阻抗的变化， $t_0$ 时刻冲击电流 $I_{peak}$ 等效公式可近似表示为公式（5）：

$$I_{peak} = \left( \frac{V_{max} - V_{min}}{V(t_0)} + 1 \right) \times I(t_0) \dots\dots\dots (5)$$

式中：

- $I_{peak}$  —— $t_0$ 时刻施加在电机上的电流值；  
 $V_{max}$  ——电网或变频支路电压偏高的电压峰值；  
 $V_{min}$  ——电网或变频支路电压偏低的电压峰值；  
 $V(t_0)$  —— $t_0$ 时刻施加在电机上的电压值；  
 $I(t_0)$  —— $t_0$ 时刻施加在电机上的电流值。

### 4.3 切换条件

高压变频器驱动电机在工、变频电源之间无扰同步切换之前，准备工作包括：

- 验证电源供应的可靠性和稳定性，确保工频电源满足设备要求。电网电源幅值波动不超过±5%，频率波动不超过±1%；
- 电机和电机拖动的负载的状态可通过工艺信号量、辅助信号量进行工艺制程方面的保护，例如电机是工频运行还是变频运行，工艺端需在工频运行状态对电机增加额外的保护控制；
- 确认工变频主支路前级的断路器保护整定值设定在合适的保护值，避免切换过程异常时的冲击电流导致越级跳闸；
- 确认变频主支路三相接线相序和工频三相接线相序完全一致。

### 4.4 过程监测

在切换过程中，变频器应实时监测电流、电压和频率等参数，并记录相关数据以备后续分析和故障排除。

### 4.5 切换控制过程

#### 4.5.1 带电抗器的上切换过程

变频器上切就绪状态下收到上切指令，加速至网侧频率。在变频器输出电压与网侧电压保持幅值、相位、角度接近时，输出变频接触器/断路器和工频接触器/断路器的解锁信号。为实现切换过程对工频电网无冲击，变频输出电压与工频电网电压在幅值 $V(t)$ 、相位角 $\varphi$ 、角频率 $\omega$ 三个维度上完全一致时，输出工频接触器/断路器合闸，电机工频运行，高压变频器停机，变频接触器/断路器分闸，停止输出解锁信号，完成变频驱动到工频驱动的切换。

**注-无冲击：**无扰上切换过程中，电机端电流波动幅值不超过电机最大电流的1.5倍，波动持续时间不超过5个工频电网周期。

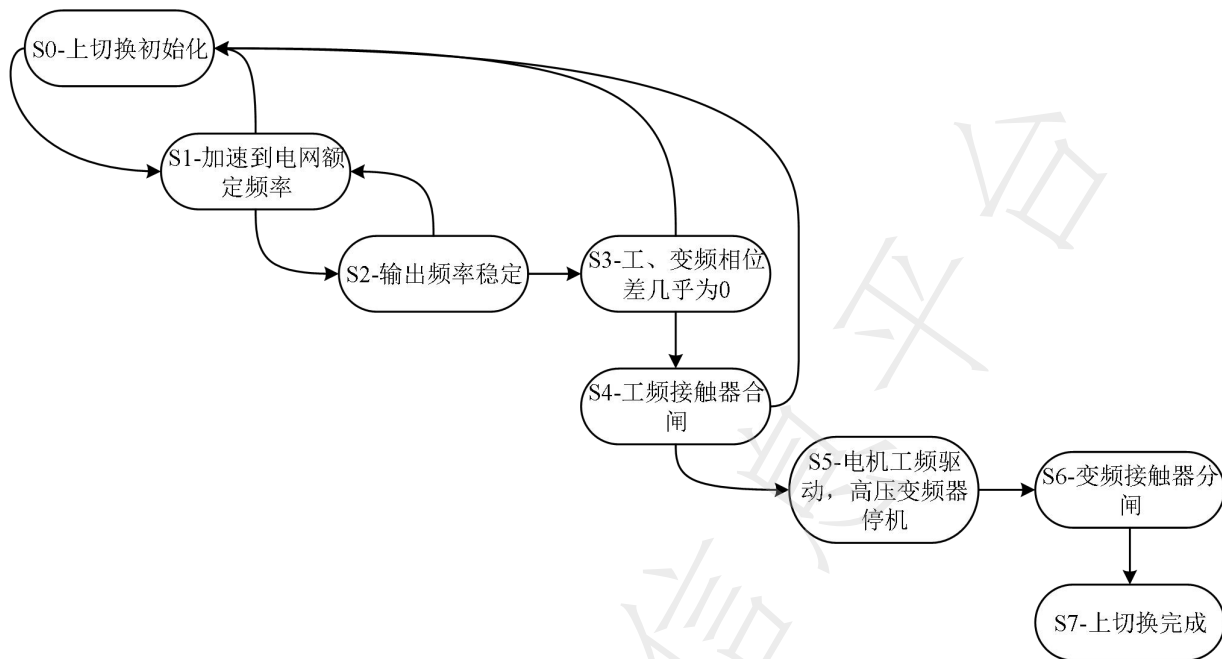


图 3 带电抗器的上切换过程流程图

#### 4.5.2 不带电抗器的上切换过程

变频器上切就绪状态下收到上切指令，加速至网侧频率。在变频器输出电压与网侧电压保持幅值、相位、角度接近时，输出变频接触器/断路器和工频接触器/断路器的解锁信号。为实现切换过程对工频电网无冲击，变频输出电压与工频电网电压在幅值  $V(t)$ 、相位角  $\varphi$ 、角频率  $\omega$  两个维度上完全一致时，且相位角  $\varphi$  逐步趋近于 0 时，输出工频接触器/断路器合闸，高压变频器在工频接触器/断路器合闸瞬间快速封波停机，然后变频接触器/断路器分闸，停止输出解锁信号，完成变频驱动到工频驱动的切换。

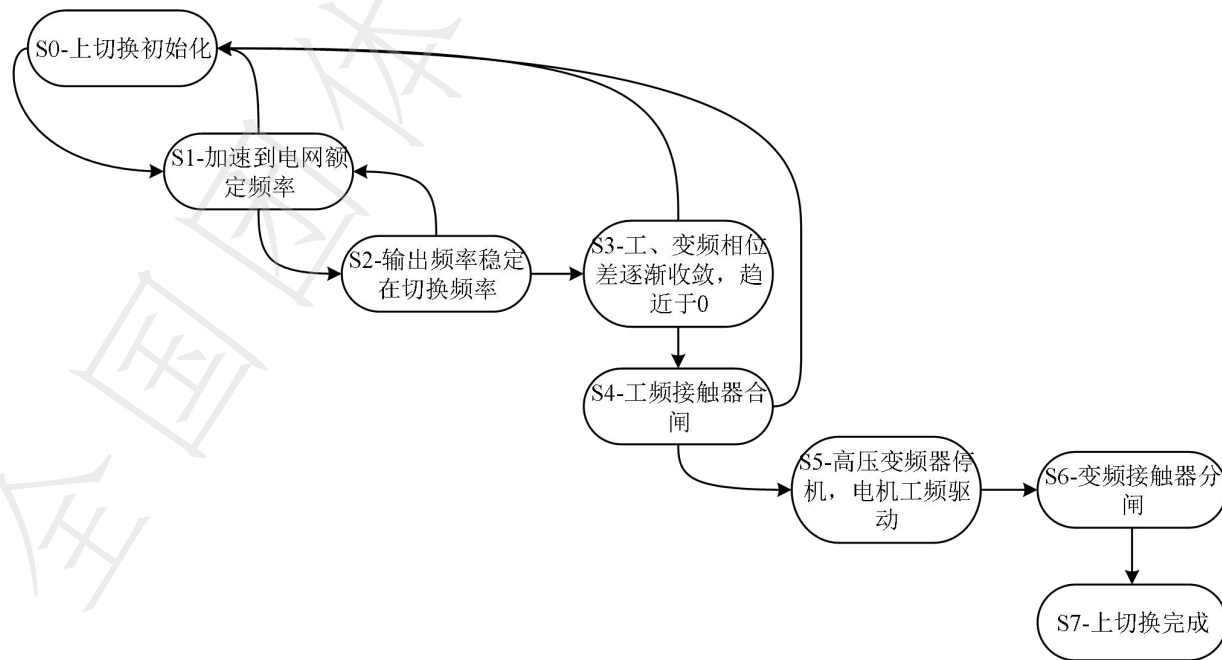


图 4 不带电抗器的上切换过程流程图

#### 4.5.3 中高压电励磁同步机的上切换过程

变频器上切就绪状态下收到上切指令，加速至网侧频率。在变频器输出电压与网侧电压保持幅值、相位、角度接近时，输出变频接触器/断路器和工频接触器/断路器的解锁信号。为实现切换过程对工频电网无冲击，变频输出电压与工频电网电压在幅值 $V(t)$ 、相位角 $\varphi$ 、角频率 $\omega$ 三个维度上完全一致时，且相位角 $\varphi$ 逐步趋近于0时，输出工频接触器/断路器合闸，高压变频器在工频接触器/断路器合闸瞬间快速封波停机，然后变频接触器/断路器分闸，停止输出解锁信号，由于电机励磁柜支持工变频两用两种模式，为保证电机励磁电流稳定、连续，根据励磁柜响应参数，高压变频器需要在工频接触器/断路器合闸后，继续保持励磁柜运行和励磁柜控制电流指令，直至励磁柜完成切换，方可终止变频器输出到励磁柜的控制信号，至此完成电励磁同步机变频驱动到工频驱动的切换。

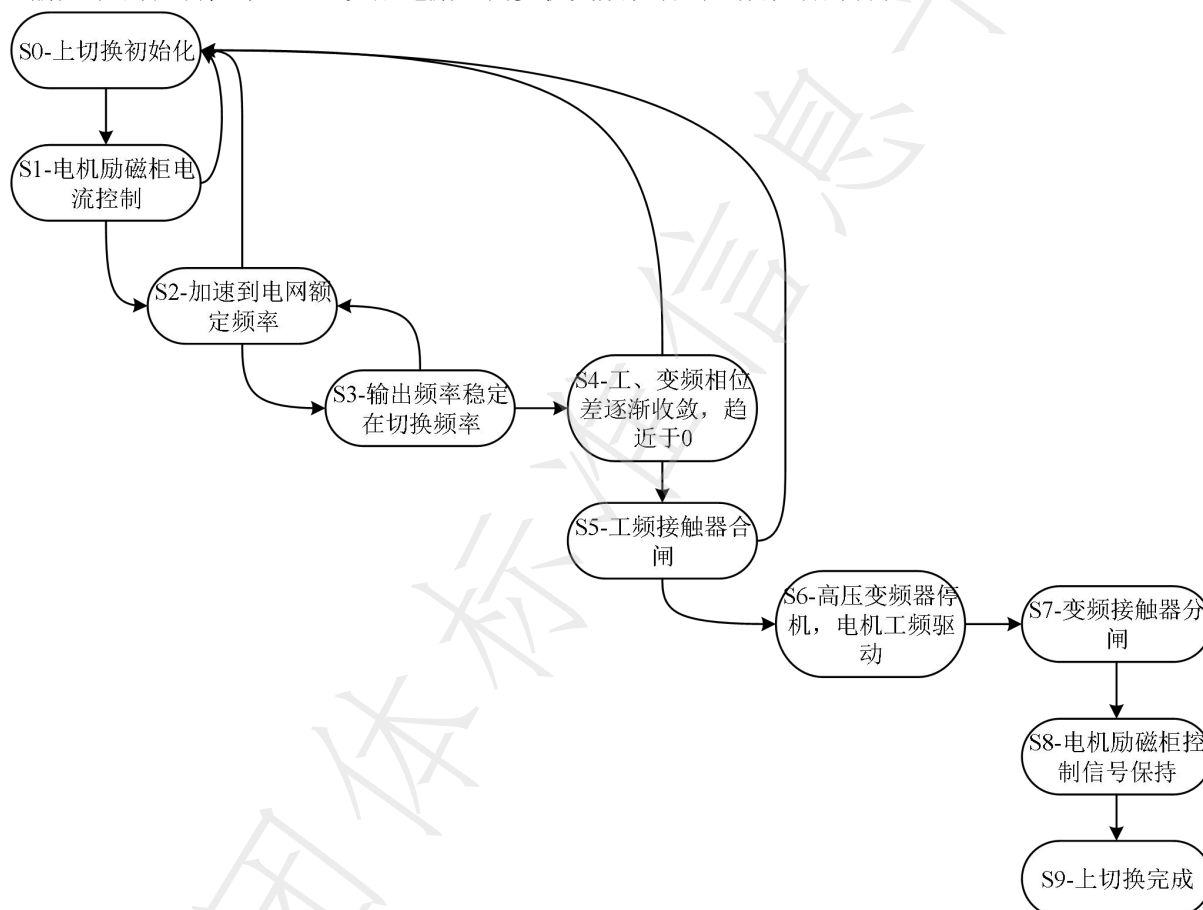


图 5 中高压电励磁同步机的上切换过程流程图

## 5 主要技术点

以下简要介绍几种中高压变频器控制电机由变频运行模式切换到工频运行模式的技术方法，但不限于以下技术方法。

### 5.1 矢量控制

矢量控制可精确控制交流电动机的转速和扭矩。它通过对电机的电压和电流进行精确控制，实现对电机的高性能运行。矢量控制基于电机的磁场理论，将电机的转子磁场和定子磁场分离控制。它通过采样电机的电流、电压等信息，以及对电机模型的数学转换，实现对电机状态的精确估计和控制，减小外界扰动对电机运行的影响。

### 5.2 磁通与速度环控制

电机磁通的大小由磁通调节器控制，它的输出形成磁化或磁通产生电流调节器的给定。电机速度由定子频率决定，受速度调节器控制。它的输出就是转矩产生电流调节器的给定。

变频器根据给定的速度指令，转换为适合电机运行的频率和电压。在速度环控制中，变频器通过不断地比较设定值和反馈速度，并根据误差信号调节输出信号，以使实际转速逐渐接近设定值。通过不断的PID闭环反馈调整，系统可以实现较为精确的速度控制。

### 5.3 电流调节器

磁通角用于将检测到的电机电流分解为励磁分量及转矩分量，这样分解使得交流电机的磁通和转矩可以像直流电机那样单独进行控制。励磁电流分量和转矩分量在电流调节器的控制下跟随各自的电流指令。电流调节器的输出形成三相电压给定信号。

### 5.4 锁相环控制

锁相环使用采样得到的电机端电压为所有内部电机控制提供磁通矢量相参考值。锁相环模块可产生磁通角 $\theta$ 和定子频率 $\omega_{out}$ ，磁通Q轴分量 $\lambda_{qs}$ 来自电机电压DQ变换模块。

锁相环技术在变频器中需要具备快速跟踪能力、高精度的频率稳定性、抗干扰能力、宽频范围，以及稳定的相位锁定和跟踪。这些要求保证了变频器能够稳定地控制输出频率，检测电网侧输入频率，满足同步切换时相位追踪的需求。

### 5.5 转矩限幅

在速度控制模式下，变频器输出转矩的最大值由转矩上限控制。

### 5.6 转速追踪启动

允许变频器测定已经处于运转状态的电机速度，因此，变频器可以向电机提供与旋转电机频率对应的输出电压，使得变频器供电时对电机的冲击最小，对旋转中电机实施平滑无冲击启动。在飞车启动时，变频器监测电机磁通并从电机当前旋转频率启动电机。

## 6 切换验收方法

在切换完成后，应进行切换验证以确保切换过程的成功和准确性。验证过程应包括以下方面：

- a) 确认电机已成功切换到工频控制，工作正常且符合预期要求：高压变频器将中高压电机从变频驱动模式切换到工频驱动模式的过程中，电机端电流波动幅值不超过电机最大电流的1.5倍，波动持续时间不超过5个工频电网周期；
- b) 检查电流和电压幅值、相位是否在正常范围：电流、电压特征无严重畸变，上级综保断路器无报警、无故障记录；
- c) 检查设备和电力系统的稳定性和连续性，电机拖动的负载运行平稳，反映负载特征的信号量无异常波动，系统无异常抖动、异响。

## 7 安全措施

执行变频器将电机从变频控制无扰切换到工频控制的过程中，应采取适当的安全措施，包括但不限于以下方面：

- a) 操作员应接受相关培训，了解操作流程，并监控切换过程；
- b) 切换过程中应使用合适的个人防护装备；

- c) 变频器和电机应符合相关安全标准和规定；
- d) 操作员应佩戴个人防护装备，包括安全帽、护目镜、绝缘手套等，确保人员的安全；
- e) 操作员应严格按照操作规范执行切换操作，并遵循相关安全程序；
- f) 在发生紧急情况时，操作员应立即中止切换并采取适当的应急措施，如切断电源、启动紧急停机装置等；
- g) 进行切换操作前，应对操作员进行必要的培训，确保其具备足够的知识和技能。

## 8 维护和记录

应建立相应的维护和记录程序，包括但不限于以下方面：

- a) 定期检查和维护变频器和电机，确保其正常工作；检查和维护期间必须标注；
- b) 负责设备检查和维护的操作人员必须具备相关的操作资质，包括但不限于低压电工证、高压电工证；
- c) 控制上切换的中高压变频器宜具有日志功能，详细记录切换过程中的参数和事件，以供后续分析和故障排除。

## 9 异常情况处理

控制上切换的中高压变频器应考虑切换失败情况下的应急处理措施，包括但不限于以下方面：

- a) 紧急停止切换过程，确保设备和人员的安全；
  - b) 分析和排除故障，并采取适当的措施修复设备。
-