



# 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 41010—2018

---

## 交流电弧炉供电技术导则 电能质量控制

Power supply technical guidelines for AC electric arc furnace—  
Power quality control

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

---

国 家 能 源 局 发 布

目 次

前言 ..... I

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 通用性要求 ..... 4

5 电能质量控制方案 ..... 4

6 电能质量控制装置设计与参数校核 ..... 8

7 运行控制..... 16

附录 A（资料性附录） 国内典型的超高功率电弧炉电能质量控制装置 ..... 18

附录 B（资料性附录） TCR 的谐波电流发生量 ..... 19

附录 C（资料性附录） 考虑间谐波的 2 次滤波支路参数校核方法 ..... 20

附录 D（资料性附录） 无源滤波器参数校核仿真案例 ..... 22

参考文献 ..... 27

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本标准由全国电压电流等级和频率标准化技术委员会(SAC/TC 1)提出并归口。

本标准起草单位:安徽大学、国网河北省电力公司电力科学研究院、国网江苏省电力公司电力科学研究院、全球能源互联网研究院、西安博宇电气有限公司、国网山西省电力公司电力科学研究院、中冶京诚工程技术有限公司、马鞍山钢铁股份有限公司、英博电气股份有限公司、宝钢安大电能质量有限公司、安徽一天电能质量技术有限公司、安徽节源节能科技有限公司、国网安徽省电力公司电力科学研究院、宝钢钢铁股份有限公司、荣信电力电子股份有限公司、上海思源电气股份有限公司、北京博电新能电力科技有限公司。

本标准主要起草人:朱明星、段晓波、袁晓冬、周胜军、李令冬、林海雪、刘军成、王金浩、刘广文、苏国友、马丰民、黄捷、张四海、刘治恩、罗亚桥、顾建军、张凡勇、黄祥伟、齐泽锋。

# 交流电弧炉供电技术导则

## 电能质量控制

### 1 范围

本标准规定了交流电弧炉电能质量控制的通用性要求、控制方案、装置设计与参数校核以及运行控制。

本标准适用于 110 kV~330 kV 专线供电的 70 t~250 t 初炼交流电弧炉、70 t~300 t 钢包精炼炉系统,其他类型交流电弧炉供电系统可参照本标准。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 14549—1993 电能质量 公用电网谐波

GB/T 20298 静止无功补偿装置(SVC)功能特性

GB/T 26868—2011 高压滤波装置设计与应用导则

DL/T 1216 配电网静止同步补偿装置技术规范

DL/T 1217 磁控型可控并联电抗器技术规范

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

**交流电弧炉** AC electric arc furnace; ACEAF

以交流电弧作为主要热源的炉子。交流电弧炉是初炼交流电弧炉(EAF)和钢包精炼炉(LF)的总称。

#### 3.2

**电能质量** power quality; quality of power system

电力系统指定点处的电特性,关系到供用电设备正常工作(或运行)的电压、电流的各种指标偏离基准技术参数的程度。

注:基准技术参数一般是指理想供电状态下的指标值,这些参数可能涉及供电与负荷之间的兼容性。

[GB/T 32507—2016,定义 2.1.1]

#### 3.3

**公共连接点** point of common coupling; PCC

电力系统中一个以上用户的连接处。

[GB/T 32507—2016,定义 2.1.19]

#### 3.4

**基波(分量)** fundamental (component)

周期量经傅里叶级数展开后工频对应的正弦波分量。

[GB/T 32507—2016,定义 2.6.4]

3.5

**谐波(分量) harmonic (component)**

对非正弦周期量进行傅里叶级数分解,得到的频率为基波频率整数倍的正弦分量。

[GB/T 32507—2016,定义 2.6.7]

3.6

**谐波次数( $h$ ) harmonic order ( $h$ )**

谐波频率与基波频率的整数比。

[GB/T 14549—1993,定义 3.5]

3.7

**不平衡度 unbalance factor**

$\epsilon$

三相电力系统中三相不平衡的程度,用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的方均根值百分比表示。电压、电流的负序不平衡度和零序不平衡度分别用  $\epsilon_{U_2}$ 、 $\epsilon_{U_0}$  和  $\epsilon_{I_2}$ 、 $\epsilon_{I_0}$  表示。

注: 改写 GB/T 15543—2008,定义 3.2。

3.8

**电压偏差 voltage deviation**

实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值,以百分数表示。

[GB/T 12325—2008,定义 3.4]

3.9

**电压波动 voltage fluctuation**

电压方均根值(有效值)一系列的变动或连续的改变。

[GB/T 12326—2008,定义 3.3]

3.10

**闪变 flicker**

人对于视觉不稳定的感受,这种视觉不稳定是由于供电电压波动引起光源的照度或频率随时间变化而导致的。

[GB/T 32507—2016,定义 2.5.7]

3.11

**基波功率因数 power factor of the fundamental**

基波有功功率与视在功率之比。

注: 改写 GB/T 26868—2011,定义 3.2.7。

3.12

**无源滤波器 passive filter**

由滤波电路(电阻 R、电感 L、电容 C 构成)、开关、控制和保护单元等组成,可用于滤除特定频率的谐波电流。

注: 改写 GB/T 26868—2011,定义 3.3.1。

3.13

**静止无功补偿装置 static var compensator; SVC**

一种并联连接的静止无功发生器或吸收器,通过对其感性或容性电流的调整,来维持或控制其与电网连接点的某种参数(典型情况为控制母线电压)。

[GB/T 20298—2006,定义 3.1.1]

## 3.14

**晶闸管控制电抗器 thyristor-controlled reactor;TCR**

与电网并联连接的、晶闸管控制的电抗器,通过对晶闸管阀导通角的控制,其有效感抗可以连续变化。

[GB/T 20298—2006,定义 3.1.2]

## 3.15

**磁控型可控并联电抗器 magnetically controlled shunt reactor;MCSR**

通过改变铁芯的饱和程度来实现电抗值调节的并联电抗器。

[DL/T 1217—2013,定义 3.2]

## 3.16

**配电网静止同步补偿装置 distribution static synchronous compensator;DSTATCOM**

由并联接入系统的电压源换流器构成,其输出的容性或感性无功电流在允许的系统电压范围内连续可调且与系统电压无关,用于配电网中改善电能质量及功率因数的装置。

注:也称配电网静止无功发生器(Static Var Generator,SVG)。

[DL/T 1216—2013,定义 3.2]

## 3.17

**阶跃响应时间 step response time**

当输入阶跃控制信号后,电能质量控制装置输出电气量从 0 目标值达到 90% 目标值所用的时间,且期间没有产生过冲,见图 1。

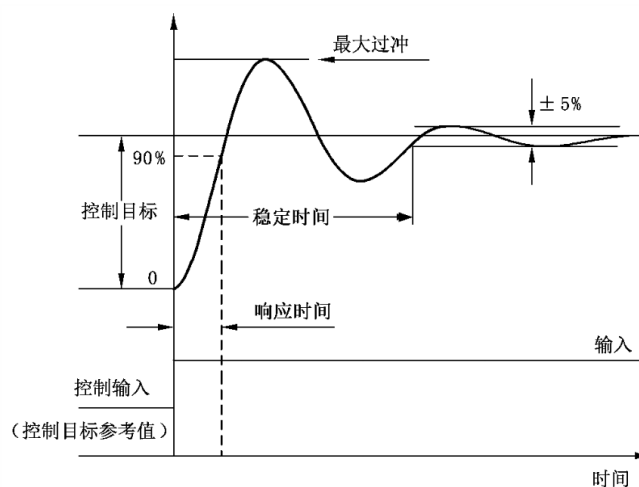


图 1 阶跃响应时间和稳定时间定义

注: 改写 DL/T 1216—2013,定义 3.12。

## 3.18

**稳定时间 settling time**

当输入阶跃控制信号后,电能质量控制装置输出电气量达到目标值的 $\pm 5\%$ 范围内所用的时间,见图 1。

注: 改写 DL/T 1193—2012,定义 3.5.15。

## 3.19

**改善率 improvement ratio**

$k$

对电能质量补偿(控制)设备综合控制效果的描述,其值等于补偿设备投运前后在待评估节点测量

到的某指标的相对变化。

$$k = \frac{x_o - x_t}{x_o} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：  
 $x_o$  —— 补偿设备运行前某电能质量指标的评估值；  
 $x_t$  —— 补偿设备运行后某电能质量指标的评估值。

4 通用性要求

4.1 安全性

- 4.1.1 对电弧炉进行电能质量控制,应保证电弧炉运行的安全性。
- 4.1.2 电弧炉电能质量控制装置投入、切除、正常及异常运行时不应对电弧炉配电系统安全运行产生影响。
- 4.1.3 电能质量控制装置应具备自动控制、保护单元、设备可靠接地、闭锁装置、围网设置和警告标志等可靠的技术措施。

4.2 可靠性

在规定的运行环境和运行条件下,电能质量控制应保证电弧炉和控制系统连续可靠工作。对于特殊的运行环境和运行条件,应通过采用相应的技术措施来满足可靠性要求。

4.3 功能

- 电弧炉电能质量控制系统一般应具备如下功能：
- a) 电压波动与闪变抑制；
  - b) 三相不平衡抑制；
  - c) 谐波和间谐波滤波；
  - d) 功率因数调节；
  - e) 电压偏差控制。

4.4 经济性

在满足 4.1 和 4.2 要求的前提下,交流电弧炉电能质量控制应综合考虑缩短电弧炉冶炼周期、减小吨钢电耗、电极损耗和耐材指数,以及控制方案的运行成本和投资成本。

4.5 灵活性

电弧炉电能质量控制方案应能满足不同运行工况下灵活运行的需求,并允许电能质量控制装置具有多种组合运行方式。

5 电能质量控制方案

5.1 控制方案分类

5.1.1 分类

电弧炉电能质量控制方案包括电能质量控制装置和电弧炉电极运行控制两类。

### 5.1.2 电能质量控制装置

推荐以下三种类型的电能质量控制装置(不限于):

- a) 无源滤波器(PF)和晶闸管控制电抗器(TCR)组成的动态补偿装置,称为 TCR 型 SVC;
- b) 无源滤波器(PF)和磁控型可控并联电抗器(MCSR)组成的动态补偿装置,称为 MCSR 型 SVC;
- c) 无源滤波器(PF)和配电网静止无功发生器(SVG)组成的动态补偿装置,称为混合型 SVG。

以上三种电能质量控制装置均由无源滤波器和动态补偿支路组成,通过无源滤波器的谐波滤波和静态无功补偿功能,以及动态补偿支路(TCR、MCSR 或 SVG)的动态无功补偿和分相调节功能,减小电弧炉负荷注入电网的谐波电流、间谐波电流、负序电流以及无功电流,改善电弧炉用户接入公用电网公共连接点的电能质量指标。

国内典型的超高功率电弧炉电能质量控制装置,参见附录 A。

### 5.1.3 电弧炉电极运行控制

电弧炉电极运行控制通过调整电弧炉变压器档位和电极位置,控制电弧炉的弧压、弧流及平稳性,实现对电弧炉负荷有功功率、无功功率和功率因数的控制。优化电弧炉电极运行控制,可减少电弧炉谐波电流、间谐波电流、负序电流和无功电流的发生量,改善电弧炉用户接入公用电网公共连接点的电能质量指标。

当采用电弧炉电极运行控制降低电弧炉电能质量干扰发生量时,还应考虑以下约束条件:

- a) 冶炼动态工艺对有功和电弧长度需求;
- b) 耐火材料磨损指数、电极消耗不大于规定限值;
- c) 视在功率、功率因数、电极电流等参数应在允许工作范围内。

### 5.1.4 控制方案适用性

5.1.4.1 当电弧炉用户接入公用电网公共连接点的电能质量指标不满足限值要求时,应优先考虑电弧炉电极运行的优化控制。

5.1.4.2 当电极运行优化控制后电能质量指标仍不满足限值要求时,应考虑设置电能质量控制装置,通过电能质量控制装置和电弧炉电极运行的综合优化控制,实现电弧炉用户的电能质量控制。

## 5.2 控制方案制定依据

### 5.2.1 电网供电参数

电弧炉电能质量控制方案设计和仿真校核时应搜集其接入公用电网公共连接点的供电参数,主要包括:

- a) 电网频率及其变化范围(Hz);
- b) 系统标称电压(kV);
- c) 最高持续运行电压(kV);
- d) 最低持续运行电压(kV);
- e) 系统短时最高运行电压(kV)及其最大持续时间(s);
- f) 系统短时最低运行电压(kV)及其最大持续时间(s);
- g) 系统正常运行方式下最大和最小短路容量(MVA);



- h) 系统正常运行方式下供电容量和电弧炉用户用电容量(MVA);
- i) 背景电能质量参数,包括电压偏差、电压波动和闪变、三相电压不平衡度以及谐波电压等;
- j) 电网运行方式,分布式电源接入系统方式与容量。

### 5.2.2 供配电系统参数

电弧炉电能质量控制方案设计和仿真校核时应搜集其供配电系统参数,主要包括:

- a) 供电变压器参数:额定电压、额定电流、额定容量、短路阻抗、连接组别等;
- b) EAF 和 LF 变压器参数:各电压档位的额定容量、额定电压、额定电流、短路阻抗以及变压器过载能力等;
- c) EAF 和 LF 变压器接入系统的标称电压;
- d) EAF 串联电抗器参数:各档位的电抗值;
- e) EAF 和 LF 短网阻抗。

### 5.2.3 电弧炉干扰发生量

设计电弧炉电能质量控制装置的容量与参数时,应搜集其干扰发生量,主要包括:

- a) 谐波电流频谱分布及发生量的 95% 概率大值和最大值;
- b) 间谐波电流频谱分布及发生量的 95% 概率大值和最大值;
- c) 负序电流发生量的 95% 概率大值和最大值以及波动水平;
- d) 无功功率发生量及波动水平;
- e) 有功功率发生量及波动水平。

在条件允许的情况下,电弧炉干扰发生量应以实际测量值为准;当不具备测量条件时,应以电弧炉制造厂家提供的干扰发生量为准;当不具备测试条件且电弧炉制造厂家无法提供干扰发生量的情况下,建议根据供配电系统参数和电弧炉配电参数,由工程经验值估算电弧炉的干扰发生量。

注:电能质量控制装置投运后,电弧炉干扰发生量一般存在增大的现象。

### 5.2.4 电能质量允许值

确定电弧炉电能质量控制目标时,应根据电网供电参数、电弧炉配电系统参数、电能质量国家标准和电网企业有关管理规定,计算电弧炉用户接入公用电网公共连接点的电能质量允许值,主要包括:

- a) 负序电流;
- b) 谐波电流;
- c) 间谐波电流;
- d) 电压波动与闪变;
- e) 供电总进线的平均功率因数。

### 5.2.5 电能质量评估

电弧炉接入公用电网的电能质量评估是制定电能质量控制方案的重要环节,应基于电能质量评估结论制定电能质量控制方案。

## 5.3 控制方案制定流程

电弧炉电能质量控制方案制定流程见图 2。

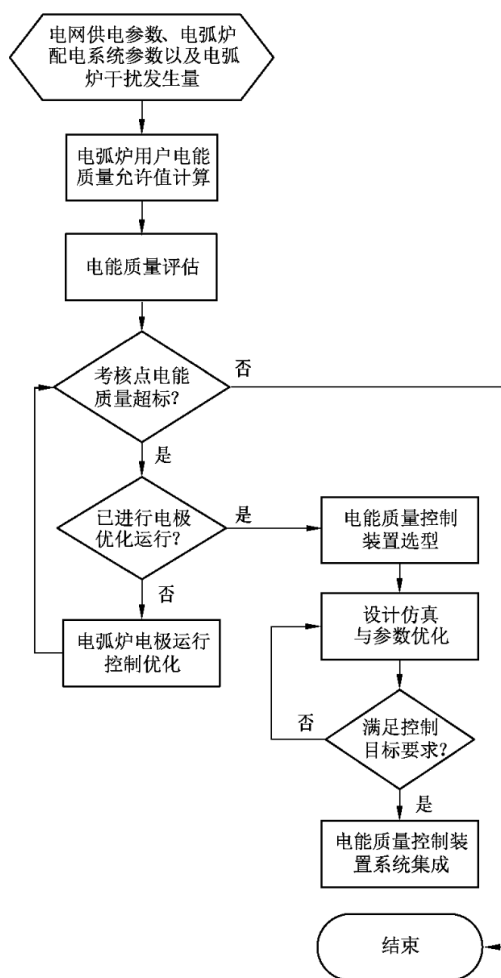


图2 电能质量控制方案制定流程

## 5.4 控制方案技术经济评价指标

### 5.4.1 控制特性指标

主要指阶跃响应时间和镇定时间,直接影响由无功冲击引起的电压波动和闪变、三相电压不平衡的改善效果。

### 5.4.2 电能质量改善率指标

电能质量控制方案实施后,电能质量指标改善率的评价应包括如下方面:

- a) 谐波电流改善率;
- b) 间谐波电流改善率;
- c) 负序电流改善率;
- d) 电压闪变改善率;
- e) 电压波动改善率;
- f) 功率因数改善率。

### 5.4.3 经济指标

电能质量控制方案经济指标的评价,一般包括如下方面:

- a) 冶炼周期缩短率;
- b) 电耗减少率;
- c) 电极损耗减少率;
- d) 耐材指数减少率;
- e) 方案投资成本;
- f) 运行成本。

## 6 电能质量控制装置设计与参数校核

### 6.1 无功需求确定

无功需求计算应综合考虑 EAF 和 LF 的最大无功发生量和同时率,工程推荐值按照式(2)确定:

$$Q_D = k_1 Q_{\text{EAF,max}} + k_2 Q_{\text{LF,max}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- $Q_D$  ——无功需求,单位为兆乏(Mvar);
- $k_1$  ——EAF 无功发生量的计算系数,工程推荐值为 0.9~1.2;
- $Q_{\text{EAF,max}}$  ——EAF 最大无功发生量,单位为兆乏(Mvar);
- $k_2$  ——LF 无功发生量的计算系数,工程推荐值为 0.4~0.6;
- $Q_{\text{LF,max}}$  ——LF 最大无功发生量,单位为兆乏(Mvar)。

### 6.2 动态补偿支路设计

#### 6.2.1 类型确定

动态补偿支路类型的确定应综合考虑以下方面:

- a) 控制特性:动态补偿支路控制特性与其阶跃响应时间和稳定时间有关,阶跃响应时间和稳定时间越短,电能质量改善率越高。根据 GB/T 20298、DL/T 1217 和 DL/T 1216 中对 TCR、MCSR 和 SVG 响应时间的要求,SVG 响应时间一般不大于 10 ms,TCR 响应时间一般不大于 50 ms,MCSR 响应时间一般不大于 600 ms。
- b) 电能质量改善率:对电弧炉产生的谐波电流、间谐波电流、负序电流、电压波动和闪变等的改善率。
- c) 经济指标:装置运行成本、投资成本以及对电弧炉冶炼周期缩短和吨钢电耗减小的效益等。
- d) 环境兼容性:装置占地面积和运行噪声等。

#### 6.2.2 额定参数

##### 6.2.2.1 容量计算

6.2.2.1.1 采用 TCR 和 MCSR 时,一般情况下,动态补偿支路的额定容量按照式(3)计算:

$$Q_{\text{TCR(或MCSR)}} = k_3 Q_D \dots\dots\dots (3)$$

式中:

- $Q_{\text{TCR(或MCSR)}}$  ——TCR 或 MCSR 动态补偿支路的额定容量,单位为兆乏(Mvar);
- $k_3$  ——综合考虑电能质量改善率、分相补偿和电能质量控制装置的修正系数,工程推荐值为 0.9~1.2;
- $Q_D$  ——无功需求,单位为兆乏(Mvar)。

6.2.2.1.2 采用 SVG 时,一般情况下,动态补偿支路额定容量按照式(4)计算:

$$Q_{\text{SVG}} = k_4 Q_{\text{D}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$Q_{\text{SVG}}$ ——SVG 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)；

$k_4$ ——综合考虑电能质量改善率、分相补偿和电能质量控制装置的修正系数，工程推荐值为 0.4~0.6；

$Q_{\text{D}}$ ——无功需量，单位为兆乏(Mvar)。

### 6.2.2.2 TCR 型

考虑不同制造商 TCR 晶闸管阀导通角的控制范围，TCR 相控电抗器的额定电抗和额定电感值按式(5)和式(6)计算：

$$X_{\text{TCR}} = k_5 \frac{3U_{\text{N}}^2}{Q_{\text{TCR}}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$X_{\text{TCR}}$ ——TCR 相控电抗器额定基波电抗，单位为欧姆( $\Omega$ )；

$k_5$ ——TCR 相控电抗器额定电抗修正系数，工程推荐值为 0.7；

$U_{\text{N}}$ ——TCR 接入中压母线的标称电压，单位为千伏(kV)；

$Q_{\text{TCR}}$ ——TCR 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)。

$$L_{\text{TCR}} = \frac{X_{\text{TCR}}}{2\pi f_1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$L_{\text{TCR}}$ ——TCR 相控电抗器额定电感值，单位为亨利(H)；

$X_{\text{TCR}}$ ——TCR 相控电抗器额定基波电抗，单位为欧姆( $\Omega$ )；

$f_1$ ——系统标称频率，单位为赫兹(Hz)。

TCR 额定电流按式(7)计算：

$$I_{\text{N,TCR}} = \frac{Q_{\text{TCR}}}{3U_{\text{N}}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$I_{\text{N,TCR}}$ ——TCR 相控电抗器的额定电流，单位为千安(kA)；

$Q_{\text{TCR}}$ ——TCR 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)；

$U_{\text{N}}$ ——TCR 接入母线的标称电压，单位为千伏(kV)。

### 6.2.2.3 MCSR 型

MCSR 等效额定阻抗和等效额定电感按照式(8)和式(9)计算：

$$X_{\text{MCSR}} = \frac{3U_{\text{N}}^2}{Q_{\text{MCSR}}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$X_{\text{MCSR}}$ ——MCSR 等效额定基波电抗，单位为欧姆( $\Omega$ )；

$U_{\text{N}}$ ——MCSR 接入母线的标称电压，单位为千伏(kV)；

$Q_{\text{MCSR}}$ ——MCSR 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)。

$$L_{\text{MCSR}} = \frac{X_{\text{MCSR}}}{2\pi f_1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$L_{\text{MCSR}}$ ——MCSR 等效额定电感值，单位为亨利(H)；

$f_1$ ——系统标称频率，单位为赫兹(Hz)。

MCSR 的额定电流按照式(10)计算：

$$I_{\text{N,MCSR}} = \frac{Q_{\text{MCSR}}}{3U_{\text{N}}} \dots\dots\dots ( 10 )$$

式中：

$I_{\text{N,MCSR}}$ ——MCSR 的额定电流，单位为千安(kA)；

$Q_{\text{MCSR}}$ ——MCSR 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)；

$U_{\text{N}}$ ——MCSR 接入母线的标称电压，单位为千伏(kV)。

6.2.2.4 SVG 型

SVG 额定电流按式(11)计算：

$$I_{\text{N,SVG}} = \frac{Q_{\text{SVG}}}{3U_{\text{N}}} \dots\dots\dots ( 11 )$$

式中：

$I_{\text{N,SVG}}$ ——SVG 的额定电流，单位为千安(kA)；

$Q_{\text{SVG}}$ ——SVG 动态补偿支路的额定容量，单位为兆乏(Mvar)；

$U_{\text{N}}$ ——SVG 接入母线的标称电压，单位为千伏(kV)。

6.2.3 接线方式

6.2.3.1 TCR 型

为实现分相控制功能，TCR 应采用三角形接线。一般每相晶闸管的两侧各连接一组线圈，见图 3。

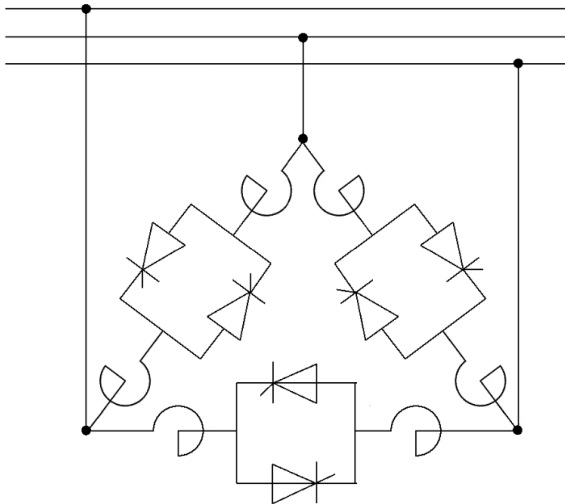


图 3 TCR 的接线方式

6.2.3.2 MCSR 型

为实现分相控制功能，MCSR 应采用三角形接线，每相磁控电抗器分别由不同整流电路控制各自的励磁电流大小，见图 4。

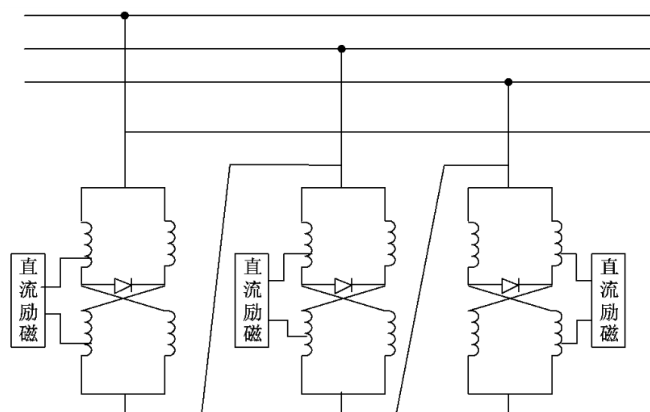


图4 MCSR 直流励磁和接线方式

### 6.2.3.3 SVG 型

为实现分相控制的功能,SVG 应采用三角形接线,见图 5。

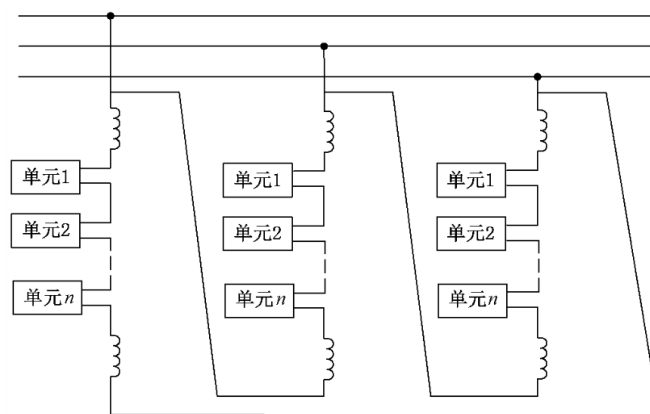


图5 SVG 接线方式

### 6.2.4 谐波发生量

#### 6.2.4.1 TCR 型

TCR 晶闸管阀导通角  $\theta$  决定了其谐波电流发生量大小,理想情况下,TCR 各次谐波电流发生量按式(12)计算:

$$I_h(\theta) = \frac{U_N}{X_{\text{TCR}}} \frac{2}{\pi} \left[ -2 \frac{\cos\theta}{h} \sinh\theta + \frac{\sin(h-1)\theta}{h-1} + \frac{\sin(h+1)\theta}{h+1} \right] \dots\dots\dots (12)$$

式中:

- $\theta$  —— TCR 晶闸管阀导通角;
- $I_h(\theta)$  —— 导通角  $\theta$  对应的  $h$  次谐波电流发生量,单位为千安(kA);
- $h$  —— 谐波次数;
- $U_N$  —— TCR 接入母线的标称电压,单位为千伏(kV);
- $X_{\text{TCR}}$  —— TCR 相控电抗器额定基波电抗,单位为欧姆( $\Omega$ )。

TCR 谐波电流发生量的工程经验值,参见附录 B。

#### 6.2.4.2 MCSR 型

DL/T 1217 对 MCSR 性能要求中规定:在正弦波形额定电压作用下,整个运行范围内其注入系统的 50 次以下谐波电流含量应小于额定电流的 3%。

6.2.4.3 SVG 型

DL/T 1216 对 SVG 性能要求中规定：当装置不进行谐波补偿时，额定容量下输出电流的总谐波畸变率不大于 3%。

6.3 无源滤波器参数设计与校核

6.3.1 设计流程

无源滤波器设计流程见图 6。

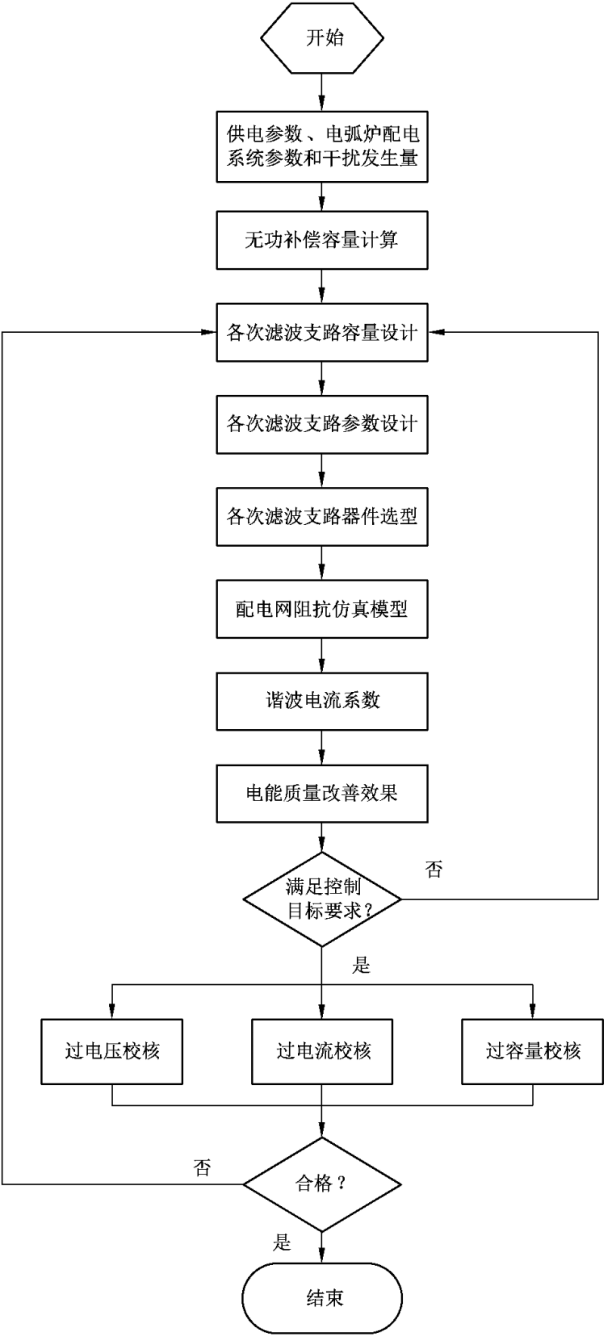


图 6 无源滤波器设计流程

### 6.3.2 支路设计

无源滤波器一般包括一条或多条滤波支路,每条支路有多种方案可供选择。考虑电弧炉谐波和间谐波发射特性,一般推荐以下两种典型的无源滤波器设计方案:

- 2次C型高通滤波器、3次单调谐滤波器和4次二阶高通滤波器;
- 2次C型高通滤波器和3次、4次、5次单调谐滤波器。

其中,单调谐滤波器、二阶高通滤波器和C型高通滤波器见图7。

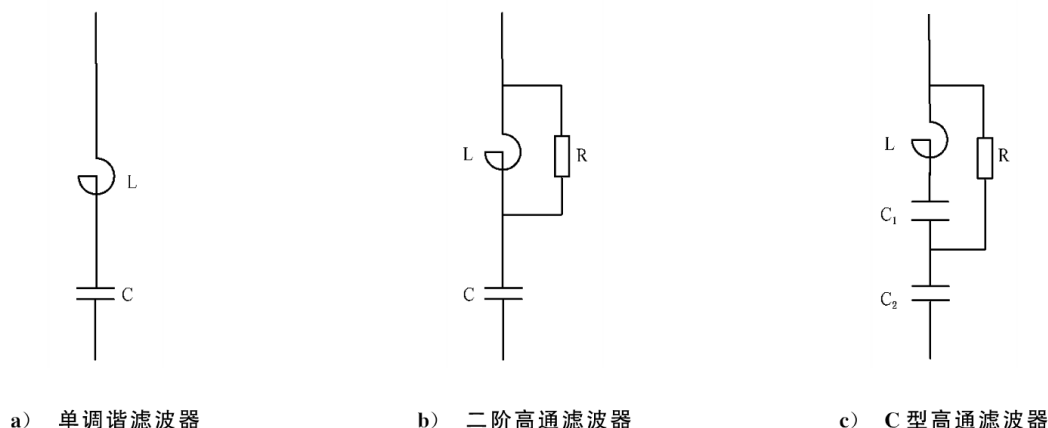


图7 常用无源滤波器

### 6.3.3 容量分配

由6.1无功需量确定各滤波支路无功补偿容量,容量分配有多种方案,式(13)为一种滤波支路补偿容量的计算方法:

$$Q_{C,h_i} = k_{h_i} \frac{I_{h_i}/h_i}{\sum_{j=1}^m (I_{h_j}/h_j)} Q_D \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中:

$Q_{C,h_i}$  ——  $h_i$  次滤波支路基波补偿容量,单位为兆乏(Mvar);

$h_i$  —— 滤波支路的次数;

$k_{h_i}$  ——  $h_i$  次滤波支路基波补偿容量的修正系数;

$I_{h_i}$  ——  $h_i$  次谐波电流发生量,单位为安培(A);

$m$  —— 滤波支路总数;

$I_{h_j}$  ——  $h_j$  次谐波电流发生量,单位为安培(A);

$Q_D$  —— 无功需量,单位为兆乏(Mvar)。

$I_{h_i}$  是EAF、LF和动态补偿支路谐波电流发生量的叠加值,叠加方法按照GB/T 14549—1993中(式C.5)相位角不确定时谐波源叠加方法计算。

修正系数确定原则:考虑到电弧炉产生的谐波电流频谱连续分布,且在整数次谐波附近的间谐波含量较高,因此,为了减小对间谐波电流的放大,相邻滤波支路中高次滤波支路容量应不大于低次滤波支路容量的2倍;为防止对电弧炉2次谐波附近间谐波电流的放大,应适当增加2次滤波支路容量;设计4次和5次单调谐滤波支路时,应适当减小3次滤波支路容量并增加4次滤波支路容量。

### 6.3.4 参数设计

#### 6.3.4.1 调谐系数

考虑到滤波电容器电容的温漂及制造偏差、滤波电抗器的制造偏差、铁芯电抗器的非线性和系统频



率的变化,可能会使滤波器特征频率阻抗呈容性而导致谐波放大,为了保证滤波器长期运行的可靠性,各滤波支路调谐系数推荐值参照 GB/T 26868—2011 中的表 5,参考值见表 1。

表 1 各滤波支路调谐系数推荐值

滤波支路	2	3	4	5
调谐系数 $\alpha$	0.96	0.975	0.97	0.975

#### 6.3.4.2 滤波电抗器品质因数

滤波电抗器品质因数设计值应满足滤波支路基波有功损耗不大于补偿容量 0.5% 的要求。

#### 6.3.4.3 C 型高通滤波器参数计算

C 型高通滤波器参数按照式(14)、式(15)、式(16)和式(17)计算:

$$C_1 = \frac{Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)}{2\pi f_1 U_N^2} \dots\dots\dots (14)$$

$$L = \frac{U_N^2}{2\pi f_1 Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)} \dots\dots\dots (15)$$

$$C_2 = \frac{Q_{C,h_i}}{2\pi f_1 U_N^2} \dots\dots\dots (16)$$

$$R = \frac{q_{fh_0} U_N^2}{h_0 Q_{C,h_i}} \dots\dots\dots (17)$$

式中:

- $C_1$  ——C 型高通滤波器辅电容器的容值,单位为法拉(F);
- $Q_{C,h_i}$  —— $h_i$  次滤波支路基波补偿容量,单位为兆乏(Mvar);
- $h$  ——滤波器次数;
- $h_0$  ——滤波器调谐次数, $h_0 = \alpha h$ ;
- $f_1$  ——系统标称频率,单位为赫兹(Hz);
- $L$  ——C 型高通滤波电抗器的电感值,单位为亨利(H);
- $C_2$  ——C 型高通滤波器主电容器的容值,单位为法拉(F);
- $R$  ——C 型高通滤波器电阻器的阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );
- $q_{fh_0}$  ——滤波器调谐频率的品质因数,取值时应考虑对调谐频率附近间谐波的放大影响,工程推荐值为 8~30。

#### 6.3.4.4 单调谐滤波器参数计算

单调谐滤波器参数按照式(18)和式(19)计算:

$$C = \frac{Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)}{2\pi f_1 h_0^2 U_N^2} \dots\dots\dots (18)$$

$$L = \frac{U_N^2}{2\pi f_1 Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)} \dots\dots\dots (19)$$

式中:

- $C$  ——单调谐滤波器电容器的容值,单位为法拉(F);
- $L$  ——单调谐滤波电抗器的电感值,单位为亨利(H)。

#### 6.3.4.5 二阶高通滤波器参数计算

二阶高通滤波器参数按照式(20)、式(21)和式(22)计算：

$$C = \frac{Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)}{2\pi f_1 h_0^2 U_N^2} \dots\dots\dots (20)$$

$$L = \frac{U_N^2}{2\pi f_1 Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)} \dots\dots\dots (21)$$

$$R = \frac{h_0 q_{fh_0} U_N^2}{Q_{C,h_i}(h_0^2 - 1)} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

$C$  ——二阶高通滤波器电容器的容值,单位为法拉(F);

$L$  ——二阶高通滤波电抗器的电感值,单位为亨利(H);

$f_1$  ——系统标称频率,单位为赫兹(Hz);

$q_{fh_0}$  ——滤波器调谐频率的品质因数,工程推荐值为 0.6~30。

#### 6.3.5 接线方式

一般推荐采用电抗器前置接线方式,见图 8。这样可以限制短路电流,同时电容器可采用双星形接法,便于使用不平衡的保护方案。在中性点非直接接地的电网中,星形接线电容器组的中性点应不接地。

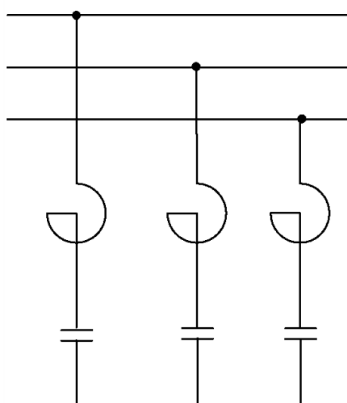


图 8 滤波支路的接线方式

#### 6.3.6 滤波器参数校核

建立电弧炉配电系统阻抗仿真模型,仿真网络阻抗的幅频特性和相频特性,计算注入系统的谐波电流系数(谐波电流源注入系统的谐波电流/谐波电流发生量),评价滤波装置的性能,并对滤波器元件的电压、电流和容量等参数进行校核,流程见图 6。

考虑间谐波的 2 次滤波支路参数校核方法参见附录 C。无源滤波器参数校核仿真案例参见附录 D。

#### 6.4 电能质量改善效果仿真

建立电弧炉供配电系统动态机理仿真模型,仿真电能质量控制装置对谐波电流、负序电流和电压波动与闪变等电能质量指标的改善效果,评价动态补偿支路的性能,优化无源滤波器和动态补偿支路的参数,流程见图 9。

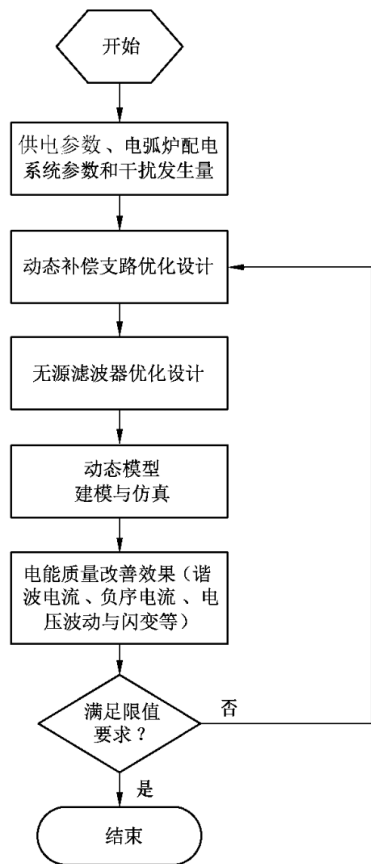


图9 电能质量控制装置仿真流程图

## 7 运行控制

### 7.1 电能质量控制装置运行控制

#### 7.1.1 投入

电能质量控制装置应在电弧炉运行前投入运行。

当动态补偿支路(TCR、MCSR 和 SVG)和低次滤波支路共用一个断路器时,应先闭合动态补偿支路断路器,然后由低次到高次投入滤波支路。

当动态补偿支路和低次滤波支路不共用同一断路器时,应先投入一组最低次滤波支路,再闭合动态补偿支路断路器,然后由低到高依次投入其他滤波支路。

对于 TCR 和 MCSR 型 SVC,动态补偿支路不能独立运行。

#### 7.1.2 退出

电能质量控制装置在电弧炉停运时应退出运行。

当动态补偿支路(TCR、MCSR 和 SVG)和低次滤波支路共用一个断路器时,由高到低依次退出滤波支路,然后退出动态补偿支路。

当动态补偿支路和低次滤波支路不共用同一断路器时,由高到低依次退出滤波支路,剩下一组最低次滤波支路时,退出动态补偿支路,再退出最低次滤波支路。

### 7.1.3 正常运行

正常运行时,应对电能质量控制装置的断路器、隔离开关、互感器、电容器、电抗器、避雷器、阀组、功率模块、冷却系统、保护与监控系统等定期进行巡视和检查,检查装置的带电指示、运行温度、振动和噪音、告警信息、监控信息等。若运行巡视中发现异常情况,应采取相应的措施,并做好记录,及时上报。

### 7.1.4 异常运行

异常运行包括如下三种情况:

- a) 电弧炉供电母线运行方式发生改变;
- b) 动态补偿支路发生故障无法投运;
- c) 无源滤波器部分支路发生故障无法投运。

当发生上述情况时,应综合考虑对系统安全稳定运行、电能质量改善率以及装置自身安全稳定运行的要求,建立仿真模型,进行组合运行方式的仿真与参数校核;当运行方式满足要求时,方可按照正常的投入和退出操作流程进行投运和切除。

## 7.2 电弧炉电极优化运行控制

### 7.2.1 EAF 电极优化运行控制

当采用电极运行控制降低电弧炉电能质量干扰发生量时,应首先考虑 EAF 的电极优化运行控制。在引弧阶段、穿井阶段和熔化初期,EAF 电能质量干扰发生量较大,可采用以下控制措施:

- a) 在引弧阶段,优化电极运行,采用中级电压、较小电流、较短电弧的较小功率供电制度,减少电能质量干扰发生量;
- b) 在穿井阶段,优化电极运行,采用较高电压、大电流或高阻抗、高电压、大电流、长电弧的较大功率供电制度,减少电能质量干扰发生量;
- c) 在熔化初期,优化电极运行,采用高电压、大电流、长电弧的最大电弧功率供电制度,减少电能质量干扰发生量。

### 7.2.2 LF 电极优化运行控制

对 LF 采取电极优化运行控制,可采用以下控制措施:

- a) 在升温阶段,优化电极运行,采用高电压、小电流、长电弧的较大功率供电制度,电弧长度要小于泡沫渣的厚度,减少电能质量干扰发生量;
- b) 在保温阶段,优化电极运行,采用较低电压、小电流、短电弧的较小功率供电制度,减少电能质量干扰发生量。

附 录 A  
(资料性附录)

国内典型的超高功率电弧炉电能质量控制装置

国内典型的超高功率电弧炉电能质量控制装置参数调研见表 A.1。

表 A.1 国内典型的超高功率电弧炉供电变压器、EAF 变压器、LF 变压器和控制装置参数调研

用户	供电变压器容量 (MVA)	EAF 变压器(MVA)	LF 变压器(MVA)	控制装置参数		
				电压等级 (kV)	动态补偿 支路类型/ 额定容量 (Mvar)	无源滤波器类型和额定容量(Mvar)
某 100 t 交流 电弧炉	100	90	25	35	TCR/100	2 次(25 Mvar C 型高通)、3 次(30 Mvar 单调谐)、 4 次(20 Mvar 单调谐)、5 次(25 Mvar 单调谐)
某 110 t 交流 电弧炉	180	100	22	35	TCR/110	2 次(30 Mvar C 型高通)、3 次(34 Mvar 单调谐)、 4 次(24 Mvar 单调谐)、5 次(28 Mvar 单调谐)
某 90 t 交流 电弧炉	90	60	12	35	TCR/88	2 次(25 Mvar C 型高通)、3 次(30 Mvar 单调谐)、 4 次(33 Mvar 二阶高通)
某 150 t 交流 电弧炉	180	125	28	33	TCR/180	2 次(54 Mvar C 型高通)、3 次(70 Mvar 单调谐)、 4 次(17 Mvar 单调谐)、5 次(39 Mvar 单调谐)
某 100 t 交流 电弧炉	120	70	15	35	TCR/95	2 次(20 Mvar C 型高通)、3 次(35 Mvar 单调谐)、 4 次(30 Mvar 二阶高通)
某不锈钢 100 t 交流电弧炉	120	80	25	35	TCR/90	2 次(20 Mvar C 型高通)、3 次(45 Mvar 单调谐)、 4 次(25 Mvar 二阶高通)
某不锈钢 140 t 交流电弧炉	160	140	28	35	SVG/82	2 次(30 Mvar C 型高通)、3 次(50 Mvar 单调谐)、 25 次(2 Mvar 二阶高通)
某 90 t 交流 电弧炉	90	60	15	35	TCR/100	2 次(30 Mvar C 型高通)、3 次(55 Mvar 单调谐)、 4 次(28 Mvar 单调谐)

**附 录 B**  
(资料性附录)

**TCR 的谐波电流发生量**

表 B.1 给出了 37 次以内的最大谐波电流含有率,一般最大值并不都在同一控制角出现,其基值为全导通时的基波分量。表 B.1 中 3 的奇次倍数的谐波(3,9,15,...)加上括号,这是由于三相系统中 TCR 一般采用三角形接线方式,当系统平衡时,所有的 3 次谐波序列的谐波电流都在闭合三角形中流通,而线电流中不出现这些谐波。

**表 B.1 对称控制下 TCR 谐波电流最大含有率**

谐波次数	含有率/%	谐波次数	含有率/%
1	100	21	(0.29)
3	(13.78)	23	0.24
5	5.05	25	0.20
7	2.59	27	(0.17)
9	(1.57)	29	0.15
11	1.05	31	0.13
13	0.75	33	(0.12)
15	(0.57)	35	0.10
17	0.44	37	0.09
19	0.35		

当 TCR 用于补偿电弧炉时,由于电弧炉电流不规则且变化很快,有必要对各相半波实现独立控制,以便减小补偿误差,但这时 TCR 将产生偶次谐波,表 B.2 列出不对称控制情况下 TCR 中谐波最大含有率。

**表 B.2 不对称控制下 TCR 谐波电流最大含有率**

谐波次数	2	3	4	5	7
含有率/%	7~8	15~20	5~7	8~10	6~7

附录 C  
(资料性附录)

考虑间谐波的 2 次滤波支路参数校核方法

交流电弧炉在冶炼过程中产生丰富的间谐波分量,主要集中在 2 次谐波附近。因此,对交流电弧炉 2 次 C 型高通滤波支路参数校核应不同于一般的滤波支路。

IEC 61000-4-7 推荐的 DFT 时间窗口长度为 10 周波,当测量窗口宽度为 10 个工频周期时,谐波分析的频率分辨率是 5 Hz,定义了谐波群和谐波子群的概念,见图 C.1。

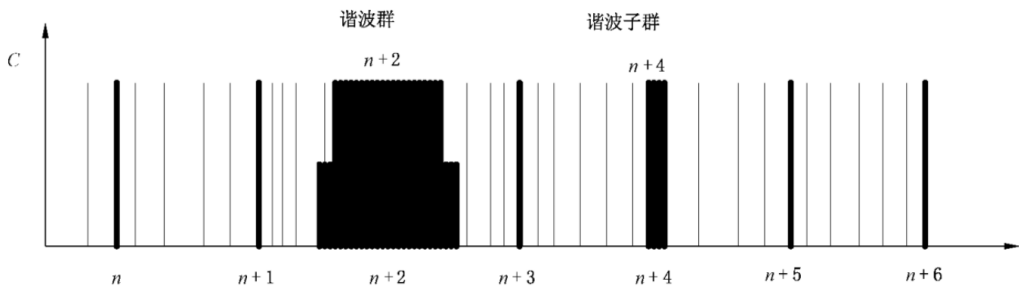


图 C.1 谐波群和谐波子群示意图

1) 谐波群的计算如式(C.1):

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \dots\dots\dots (C.1)$$

2) 谐波子群的计算如式(C.2):

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \dots\dots\dots (C.2)$$

其中,  $C_{k+i}$  是 DFT 输出对应的频谱分量有效值,  $G_{g,n}$  是谐波群有效值,  $G_{sg,n}$  是谐波子群有效值。按照上述谐波群和谐波子群的概念,计算交流电弧炉熔化前期 2~6 次谐波电流发生量,见表 C.1。

表 C.1 交流电弧炉熔化前期 2~6 次谐波电流发生量(A)

$n$	2	3	4	5	6
$I_{g,n}/A$	199.17	133.88	48.504	61.753	30.629
$I_{sg,n}/A$	81.671	107.08	27.322	50.061	18.583
注: $I_{g,n}$ 为采用谐波群方法计算的谐波电流发生量, $I_{sg,n}$ 为采用谐波子群方法计算的谐波电流发生量。					

采用谐波群、谐波子群和间谐波统计方法得到的谐波电流发生量,对交流电弧炉 2 次滤波支路参数进行校核,结果见表 C.2。

表 C.2 三种统计方法下交流电弧炉 SVC 装置 2 次滤波支路校核结果

参数	校核方法	2 次 C 型高通滤波支路					
		电 容 器 C1			电 容 器 C2		
		过电 流 $I_{C1}$ A	过电压 $U_{C1}$ kV	过容量 $Q_{C1}$ Mvar	过电 流 $I_{C2}$ A	过电压 $U_{C2}$ kV	过容量 $Q_{C2}$ Mvar
计算值	谐波群	524.52	7.9	3.53	525.96	23.77	10.65
	谐波子群	500.32	7.21	3.36	501.48	21.68	10.13
	间谐波	506.06	9.09	3.4	507.3	27.39	10.25
额定值		619.05	8.4	5.2	619.05	25.2	15.6
计算比值	谐波群	0.847	0.940	0.679	0.850	0.943	0.683
	谐波子群	0.808	0.858	0.646	0.810	0.860	0.649
	间谐波	0.817	1.082	0.654	0.819	1.087	0.657
标准比值		$\leq 1.3$	$\leq 1.1$	$\leq 1$	$\leq 1.3$	$\leq 1.1$	$\leq 1$



附录 D

(资料性附录)

无源滤波器参数校核仿真案例

D.1 供配电系统简介

某钢厂 150 t 交流电弧炉(EAF)和 150 t 精炼炉(LF)配电系统示意图见图 D.1,SVC 装置由 TCR 和滤波装置组成,滤波装置由 2 阶 C 型高通滤波器(2PF)、3 次单调谐滤波器(3PF)、4 次单调谐滤波器(4PF)和 5 次单调谐滤波器(5PF)组成。

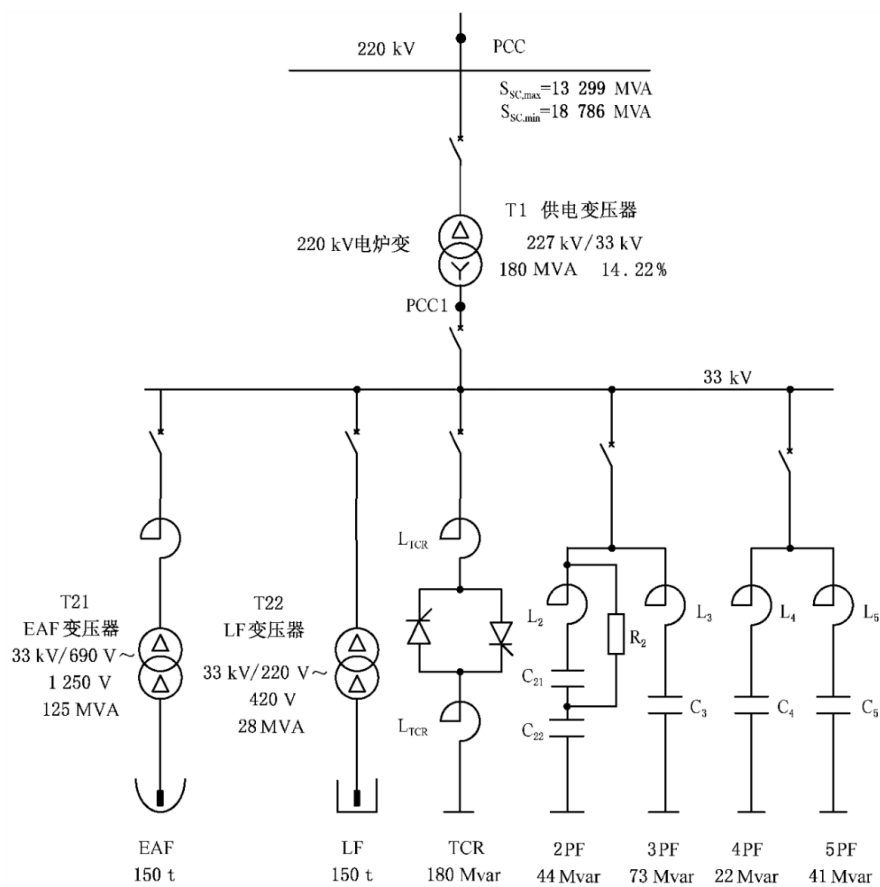


图 D.1 某钢厂 150 t 交流电弧炉配电系统示意图

D.1.1 系统参数

D.1.1.1 PCC 短路容量

最大运行方式为 18 786 MVA,最小运行方式为 13 299 MVA。

D.1.1.2 PCC1 短路容量

最大运行方式为 1 182.26 MVA,最小运行方式为 1 152.38MVA。

**D.1.1.3 供电主变压器**

供电主变压器参数为:180 MVA,227/33 kV,短路电压 14.22%。

**D.1.2 滤波装置参数****D.1.2.1 滤波器主要参数**

见表 D.1。

**表 D.1 滤波器主要参数**

滤波器次数	2	3	4	5
补偿容量/Mvar	54	70	17	39
滤波电抗器基波品质因数	140	130	50	60

**D.1.2.2 各滤波器电容器组参数**

见表 D.2。

**表 D.2 各滤波器电容器组参数**

电容器组	C21	C22	C3	C4	C5
电容值/ $\mu\text{F}$	412	158	181	46.5	109
三相安装容量/Mvar	10.5	27.4	43	10.3	21.7
额定电压/kV	9.0	23.5	27.5	26.6	25.2
基波容抗/ $\Omega$	7.73	20.77	17.59	68.38	29.20

**D.1.2.3 各滤波器电抗器参数**

见表 D.3。

**表 D.3 各滤波器电抗器参数**

电抗器	L2	L3	L4	L5
电感值/mH	24.6	6.38	14.0	3.78
额定基波电流/A	1 089	1 480	373	790
额定谐波电流/A	945	1 225	297	682
短路稳态电流/kA	4.2	10.3	6.4	13.2
短路冲击电流/kA	10.7	26.4	16.3	33.7
基波电抗/ $\Omega$	7.73	2.00	4.40	1.19

**D.1.2.4 各滤波器电阻器参数**

见表 D.4。

表 D.4 各滤波器电阻器参数

电阻器	R2
额定电阻值 (50%额定功率)/Ω	79.5
额定连续功率/kW	45.1
短时功率	3MW, 3 s

### D.1.3 EAF、LF 和 TCR 谐波电流发生量

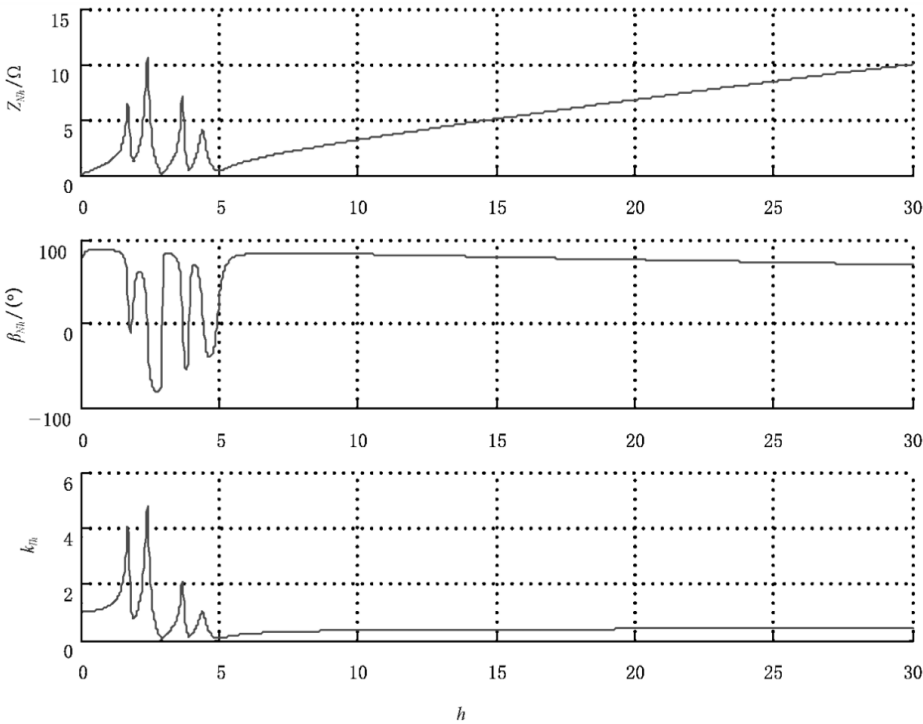
见表 D.5。

表 D.5 EAF、LF 和 TCR 谐波电流发生量

谐波 次数	33 kV 谐波电流发生量(A)				
	EAF	LF	EAF+ LF	TCR	EAF+ LF+ TCR
	$I_{h1}$	$I_{h2}$	$ \dot{I}_{h1} + \dot{I}_{h2} $	$I_{h3}$	$ \dot{I}_{h1} + \dot{I}_{h2} + \dot{I}_{h3} $
2	44.18	8.69	45.03	24.22	51.13
3	70.25	18.38	85.82	68.31	146.73
4	27.14	6.57	27.92	10.99	30.01
5	71.81	7.62	76.91	169.72	226.78
6	14.29	5.71	15.39	6.27	16.62
7	35.75	3.46	37.14	93.01	111.88
8	6.57	2.36	6.98	5.00	8.59
9	8.64	1.73	8.81	22.40	24.07
10	3.63	1.32	3.86	3.71	5.35
11	7.95	0.98	8.10	39.12	40.66
12	2.63	0.82	2.75	3.10	4.14
13	4.95	0.71	5.03	28.67	29.31
14	1.92	0.42	1.97	2.51	3.19
15	2.26	0.40	2.30	12.74	12.95
16	1.51	0.36	1.55	2.16	2.66
17	1.76	0.35	1.79	13.61	13.73
18	1.15	0.32	1.19	1.84	2.19
19	1.25	0.31	1.29	8.88	8.97
20	0.97	0.29	1.01	1.64	1.93
21	0.95	0.28	0.99	7.87	7.93
22	0.83	0.26	0.87	1.37	1.62
23	0.83	0.25	0.87	7.44	7.49
24	0.74	0.24	0.78	1.27	1.49
25	0.72	0.24	0.76	7.22	7.26

D.2 滤波器装置仿真

2 次、3 次、4 次和 5 次滤波器投入运行时，系统的阻抗特性及谐波电流系数见图 D.2。



图中：  
 $Z_{Nh}$  ——从谐波电流源侧等效的系统网络阻抗，单位为欧姆( $\Omega$ )；  
 $\beta_{Nh}$  ——网络复阻抗角，单位为度( $^{\circ}$ )；  
 $k_{1h}$  ——滤波装置滤波电流系数。

图 D.2 2 次、3 次、4 次和 5 次滤波器投入运行时系统阻抗特性及谐波电流系数  
系统的谐波电流系数见表 D.6。

表 D.6 2 次、3 次、4 次、5 次滤波器投入运行时系统的谐波电流系数

$h$	0.5	1.5	2	2.5	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$k_{1h}$	1.03	1.87	0.85	2.86	0.06	0.14	0.07	0.22	0.28	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37
$h$	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
$k_{1h}$	0.37	0.38	0.38	0.39	0.39	0.39	0.39	0.4	0.4	0.4	0.41	0.41	0.41	

系统的谐波电流系数最大值见表 D.7。

表 D.7 2 次、3 次、4 次、5 次滤波器投入运行时谐波电流系数最大值

$h$	1.72	2.42	3.68	4.42
$k_{1h}$	4.06	4.93	2.41	2.11

系统的谐波电流系数最小值见表 D.8。

表 D.8 2 次、3 次、4 次、5 次滤波器投入运行时谐波电流系数最小值

$h$	1.94	2.96	3.94	4.98
$k_{Th}$	0.74	0.02	0.10	0.07

对于其他滤波器组合投入运行的仿真内容可参照 2 次、3 次、4 次、5 次滤波器投入运行的仿真。

## 参 考 文 献

- [1] GB/T 12325—2008 电能质量 供电电压偏差
  - [2] GB/T 12326—2008 电能质量 电压波动和闪变
  - [3] GB/T 15543—2008 电能质量 三相电压不平衡
  - [4] GB/T 15945—2008 电能质量 电力系统频率偏差
  - [5] GB/T 24337—2009 电能质量 公用电网间谐波
  - [6] GB/T 26870—2011 滤波器和并联电容器在受谐波影响的工业交流电网中的应用
  - [7] GB/T 32507—2016 电能质量 术语
-