

1 概述

1.1 谐波分析问题简述

电力系统谐波分析是根据给定的电网结构，参数以及负荷，谐波源滤波器等元件的运行条件，通过谐波潮流计算确定系统中谐波电流的分布以及各部分的电压和电流波形的畸变程度，或通过计算网络的频率相应判断系统是否临近谐波谐振状态以及怎样减小系统谐振发生的可能性的计算。

对于供电部门，通过谐波分析可以检验电力系统中的电压电流波形畸变是否在允许的范围内，投入的电力设备是否会引起电网谐振或谐波电流的放大，分析电气化铁路及工业用户对整体电网的影响，从而尽可能避免谐波引起电力事故。对于大的工业用户，通过频率扫描，谐波潮流计算的数据可以选择合适的滤波器，使其对电网的谐波污染控制在国家的标准之内。

1.2 PSASP 6.2 谐波分析计算主要功能和特点

PSASP 6.2 谐波分析计算的主要功能和特点可概括为以下几个方面：

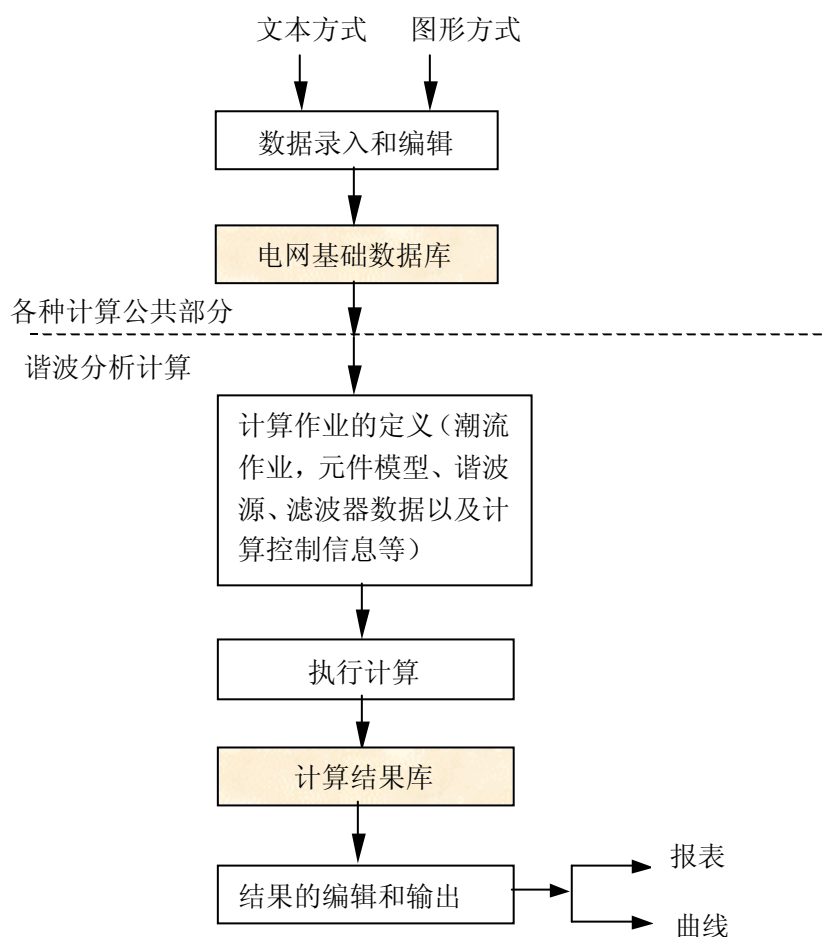
- 可选择全网任意一条母线或任意两条母线，选择任意频率段、频率间隔进行全网的频率扫描计算，得到所选母线的输入端阻抗的频率扫描或两条母线的转移阻抗的频率扫描。根据频率扫描可进一步确定系统的并联谐振频率和串联谐振频率。
- 以 PSASP 潮流计算为基础，其基本数据包括基于潮流的全部数据和零序数据，以及谐波程序中输入的元件谐波模型数据和谐波源数据。
- 可以进行全网单相谐波潮流计算(使用正序网进行各种频率的谐波潮流计算)，或三相对称谐波潮流计算(根据谐波次数分别使用正序、负序、零序网进行谐波潮流计算)。
- 可以进行全网三相不对称谐波潮流计算。
- 谐波源的输入简单、方便、灵活。并可进行多个谐波源的谐波潮流计算。
- 对交流线、变压器和负荷等元件定义了多种谐波分析模型，可根据实际情况进行选取，使计算结果更加精确。
- 定义了 9 种无源滤波器模型，可以根据电网实际情况进行方便的选择。并且根据电力牵引负荷的实际需要，定义了单相滤波器模型。

• 根据国家《电能质量公用电网谐波》(国标 GB/T14549-93)的标准,编制了谐波分析指标,并可根据公共连接点供电容量、用户协议容量等具体实际数值计算用户实际的谐波限值。

• 结果输出的内容和形式多种多样。可分别输出每条母线的谐波电压和重要的谐波度量数据,也可输出所有交流线、变压器的各次谐波电流等数据。

1.3 谐波分析计算流程

PSASP 谐波分析计算的流程和结构如下图所示:



说明:

① 谐波分析计算是以某一潮流作业为基础的,虚线以上是各种计算(包括潮流)的公共部分。

② 虚线之下为谐波分析计算特有的部分。其中需要用户参与的有三部分：

其一是谐波分析计算功能的选择；

其二是谐波分析计算中系统各元件模型的选择，以即谐波源、滤波器电力牵引负荷等谐波计算所必需的数据的输入。

其三是计算结果的编辑和输出。即选择输出的范围，输出形式、内容等。

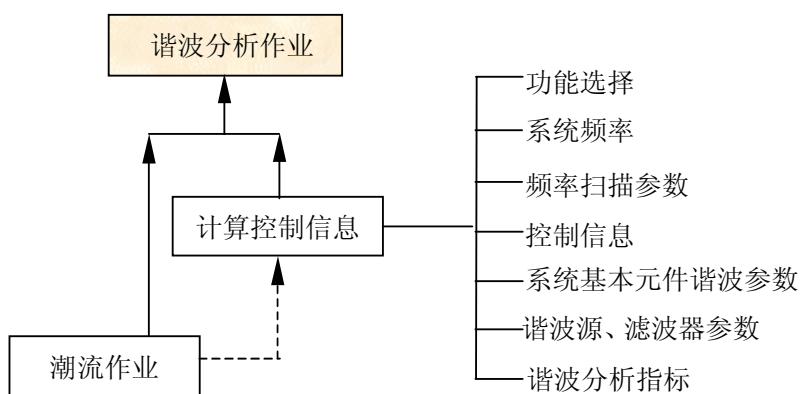
2 谐波分析计算作业的建立

2.1 谐波分析计算作业的定义

在执行谐波分析计算之前，需要定义谐波分析计算的作业。

(1) 谐波分析计算作业的构成

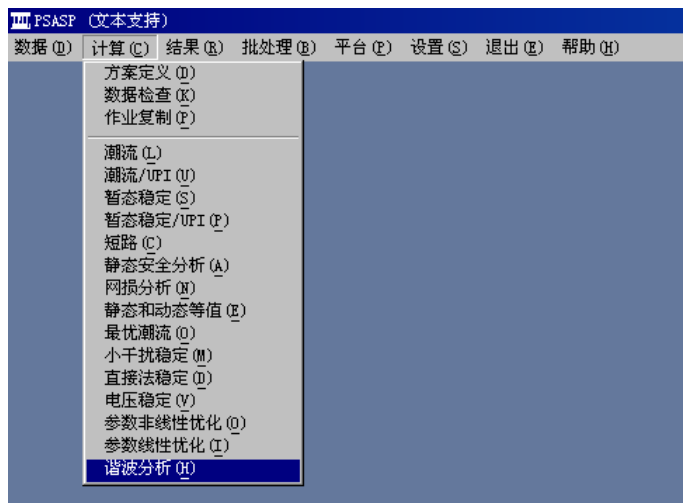
一个谐波分析作业的构成如下图所示：



(2) 谐波分析作业的定义方法

按照上述谐波分析计算作业的构成，可以在文本方式下定义不同的谐波分析计算作业，每个作业需给定一个作业号。

1) 在文本环境窗口中：



点击“计算”下拉菜单中的“谐波分析”，弹出文本方式下的谐波分析计算信息窗口：



在该窗口中选择或定义作业号后，对于已经定义好的谐波作业，即可点击“计算”按钮执行谐波分析计算。

2) 在文本方式下，谐波分析作业的定义由以下几部分组成：

作业定义栏

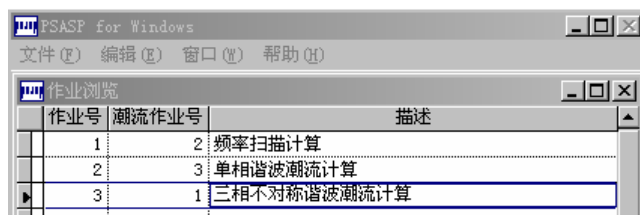
作业号：可选择已有的作业号或键入一个新号。

潮流作业：从成功计算的潮流作业中，选择其一。

点击“描述”按钮，可对该作业号给予简短的注释。

点击“删除”按钮，可删除该作业。

点击“浏览”按钮，列出全部谐波分析作业，其中包括“作业号”、“潮流作业号”和“描述”三项，如下图所示：



其中，“描述”项可以复制修改。

功能选择栏

有如下四种功能,可选其一：

谐波频率扫描计算(为缺省功能)：可选择电网中任意母线进行入端阻抗的频率扫描，或选择两条母线进行转移阻抗的频率扫描。

单相谐波潮流计算：不考虑谐波次数对网络结构的影响，所有次数的谐波计算都采用正序网进行谐波潮流计算。

三相对称谐波潮流计算：考虑谐波次数对网络结构的影响， $3n+1$ 次的谐波计算采用正序网进行， $3n+2$ 次的谐波计算采用负序网进行， $3n$ 次的谐波计算采用正序网进行。

三相不对称谐波潮流计算：可对三相不对称的谐波源进行谐波潮流计算。

控制信息栏

该栏的主要功能是对交流线、变压器和负荷指定统一的元件模型，如果在这里指定了统一模型，就可以不必在数据信息栏中进行分元件的逐个输入了。

集肤效应：当网络中含有交流线、变压器和负荷元件时，在谐波潮流计算中是否考虑其集肤效应对元件阻抗的影响。☒：为是；☐：为否。选中后，在计算中网络中的所有相应元件都将考虑集肤效应。

交流线模型：统一选择交流线模型，可选项为：

- 不统一指定模型(为缺省选项)：对交流线不统一指定模型，根据数据信息栏中的交流线信息中各条交流线分别指定的模型进行计算。

- **IEEE 交流线模型**：所有交流线在谐波分析计算中均采用 IEEE 交流线模型。
- **交流线分布参数模型**：所有交流线在谐波分析计算中均采用交流线分布参数模型。(注意：该模型需要交流线单位长度的阻抗数据，以及线路长度。)

- **IEEE 电缆模型**：所有交流线在谐波分析计算中均采用 IEEE 电缆模型。

变压器模型：统一选择变压器模型，可选项为：

- **不统一制定模型(为缺省选项)**：对变压器不统一指定模型，根据数据信息栏中的变压器信息分别指定的模型进行计算。

- **IEEE 变压器模型**：所有变压器在谐波分析计算中均采用 IEEE 变压器模型。

- **常规变压器模型**：所有变压器在谐波分析计算中均采用常规变压器模型。

- **CIGRE 变压器模型**：所有变压器在谐波分析计算中均采用 CIGRE 变压器模型，需要另外指定参数。因此选用该种模型须到数据信息栏中填写相关参数。

负荷模型：统一选择负荷模型，可选项为：

- **不统一指定模型(为缺省选项)**：对负荷不统一指定模型，根据数据信息栏中的负荷信息分别指定的模型进行计算。

- **RL 并联模型**：在谐波分析计算中所有负荷均采用 RL 并联模型。

- **电动机模型**：在谐波分析计算中所有负荷均采用电动机模型。

- **RL 串联模型**：在谐波分析计算中所有负荷均采用 RL 串联模型。

- **综合负荷模型**：在谐波分析计算中所有负荷均采用综合负荷模型。

数据信息栏

该栏包含的是谐波分析计算中元件模型、谐波源以及滤波器等的信息。

① **交流线**：点击“交流线”按钮，弹出交流线数据信息窗口：

交流线数据信息 (谐波作业号: 2)

编号: 1 I侧母线名: IND1
J侧母线名: IND2

☐ 集肤效应 交流线模型: IEEE交流线模型

数据信息

r1: 0.000000 Ohm/km
x1: 0.000000 Ohm/km
b1: 0.000 10^{-6} Siem/km
r0: 0.000000 Ohm/km
x0: 0.000000 Ohm/km
b0: 0.000 10^{-6} Siem/km
长度: 0.000 km

物理参数
组号: 0 编辑 应用

浏览 输出 保存 退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.1)

② 变压器: 点击“变压器”按钮, 弹出变压器数据信息窗口:

变压器数据信息 (谐波作业号: 2)

编号: 2 变压器类型: 2T

母线名
I侧: UTIL J侧: IND1

变压器模型: CIGRE模型

数据信息
额定容量: 20.000 MVA
RS: 200.000
RP: 6.400

Rs Rp
Xth

浏览 输出 保存 退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.2)

③ 负荷：点击“负荷”按钮，弹出负荷数据信息窗口：

负荷数据信息 (谐波分析作业号： 3)

母线名及负荷号： IND1 -- 1

负荷模型： 串联模型 ☐ 集肤效应



负荷功率 (p. u.)

PA	0.717900	QA	5.708700
PB	0.717900	QB	5.708700
PC	0.717900	QC	5.708700

负荷数据信息

DK0	0.0000	DK1	0.0000
DK2	0.0000	DKE	0.0000

浏览

输出

保存

退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.3)

④ 滤波器：点击“滤波器”按钮，弹出滤波器数据信息窗口：

滤波器数据信息 (谐波作业号: 2)

☒ 有效

谐波源编号: 1 母线名: IND1

连接方式: 三角形连接

滤波器参数

R1:	0.000000	ohm
L1:	0.000000	mH
C1:	0.000000	uF
R2:	0.000000	ohm
L2:	0.000000	mH
C2:	0.000000	uF
RG:	0.000000	ohm
XG:	0.000000	ohm

滤波器模型: High-Pass Damped



浏览 输出 保存 退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.4)

⑤ 谐波源：点击“谐波源”按钮，弹出谐波源数据信息窗口：

谐波源数据信息 (谐波作业号：2)

☒ 有效
 母线名： 谐波源编号：
 额定电流： kA 所在相位：☒ A ☒ B ☒ C

序号	谐波次数	谐波分量: I_h/I	相角 (Deg)
1	5	20.00000	-180.00
2	7	14.00000	0.00
3	11	9.10000	-180.00
4	13	7.70000	7.70
5	17	5.90000	-180.00
6	19	5.30000	0.00
7	23	4.30000	-180.00
8	25	4.00000	0.00
9	29	3.40000	-180.00
10	31	3.20000	0.00
11	35	2.90000	-180.00

模板编辑应用

模板号：

以录入和编辑其数据(参见 2.2.5)

⑥ 牵引负荷谐波源：点击“牵引负荷谐波源”按钮，弹出牵引负荷谐波源数据信息窗口：

电气铁道牵引负荷 (谐波作业号： 2)

+

-

↔

↔

🔍

✖

☐ 有效 母线名：

供电臂谐波电流及相角

序号	谐波次数	a臂谐波电流 (A)	a臂相角 (Deg)	b臂谐波电流 (A)	b臂相角 (Deg)
1	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
2	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
3	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
4	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
5	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
6	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
7	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
8	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
9	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00
10	0	0.000000	0.00	0.000000	0.00

牵引变压器数据信息

牵引变压器类型： 变比：

牵引变压器换相：

浏览

输出

保存

退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.6)

⑦谐波分析指标：点击“谐波分析指标”按钮，弹出谐波分析指标数据信息窗口：

谐波分析指标 (谐波作业号： 2)

谐波电压限值

谐波电流限值

VB (kV)	SB (MVA)	S (MVA)	2 (A)	3 (A)	4 (A)	5 (A)	6 (A)	7 (A)	8 (A)	9 (A)	10 (A)
0.380	10	10.00	78.00	62.00	39.00	62.00	26.00	44.00	19.00	21.00	00
6.000	100	100.00	43.00	34.00	21.00	34.00	14.00	24.00	11.00	11.00	00
10.00	100	100.00	26.00	20.00	13.00	20.00	8.500	15.00	6.400	6.800	00
35.00	250	250.00	15.00	12.00	7.700	12.00	5.100	8.800	3.800	4.100	00
66.00	500	500.00	16.00	13.00	8.100	13.00	5.400	9.300	4.100	4.300	00
110.0	750	750.00	12.00	9.600	6.000	9.600	4.000	6.800	3.000	3.200	00
220.0	2000	2000.0	12.00	9.600	6.000	9.600	4.000	6.800	3.000	3.200	00

* VB:标准电压 * SB:基准短路容量 * S:公共连节点的最小短路容量 * 其余为该次谐波的电流允许值

公共连接点供电容量： MVA

用电协议容量： MVA

计算

恢复默认值

保存

退出

以录入和编辑其数据(参见 2.2.7)

⑧从其它作业导入：点击“从其它作业导入”按钮，可从其它谐波分析作业导入谐波交流线、变压器、负荷、谐波源、滤波器、牵引负荷以及谐波分析指标数据：

从其他作业导入数据

1

1

2

作业描述：

确定

取消

导入数据只是两个作业数据相同的部分，不同部分仍需要进行编辑录入。

2.2 谐波分析计算作业的相关数据

由于在谐波存在的情况下，电力系统中的元件模型出现相应的变化，需要重新定义系统元件在谐波存在的情况下的模型，而且谐波计算中要涉及到谐波源、滤波器等基波潮流计算中所没有的元件。因此，谐波分析计算作业需要填写一些谐波相关数据。

2.2.1 交流线的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“交流线”按钮，弹出定义交流线的窗口，即可定义交流线谐波分析的相关数据。

交流线数据信息 (谐波作业号: 2)

编号: 1 I侧母线名: IHD1
J侧母线名: IHD2

☐ 集肤效应 交流线模型: IEEE交流线模型

数据信息

r1:	0.000000	Ohm/km
x1:	0.000000	Ohm/km
b1:	0.000	10^{-6} Siem/km
r0:	0.000000	Ohm/km
x0:	0.000000	Ohm/km
b0:	0.000	10^{-6} Siem/km
长度:	0.000	km

物理参数

组号: 0 编辑 应用

浏览 输出 保存 退出

基本项

编号: 线路编号。该线路编号是从所基于的潮流作业中提取而来，只可下拉选择不可填写新的交流线编号。

I侧母线名: 选取交流线编号后，自动显示交流线J侧母线名。

J 侧母线名：选取交流线编号后，自动显示交流线 J 侧母线名。

集肤效应：是否考虑交流线集肤效应的标记。选中 (☒) 为考虑交流线的集肤效应；不选 (☐) 为不考虑交流线的集肤效应。

交流线模型：在交流线模型下拉列表框中，显示的是谐波分析中该条交流线的模型，可以根据交流线的实际情况，以及用户需求选择模型：

①IEEE 交流线模型：该条交流线在谐波分析计算中采用 IEEE 交流线模型。该模型计算公式如下所示：

$$\begin{aligned} R_1(h) &= R_1 & R_0(h) &= R_1(h) + h(R_0 - R_1) \\ X_1(h) &= h * X_1 & X_0(h) &= h * X_0 \\ B_1(h) &= h * B_1 & B_0(h) &= h * B_0 \end{aligned}$$

如果考虑集肤效应的影响：

$$R_1(h) = R_1 * (1 + \frac{0.646h^2}{192 + 0.518h^2})$$

式中：h 为谐波次数；

$R_1, R_0, X_1, X_0, B_1, B_0$ 分别为基波情况下交流线的正序、零序电阻、正序、零序电抗以及正序、零序电纳。

②交流线分布参数模型：该条交流线在谐波分析计算中采用交流线分布参数模型。该模型较为复杂，其详细计算公式推导参见附录 A。(注意：该模型需要交流线单位长度的正序、零序阻抗数据，以及线路长度。)

③IEEE 电缆模型：该条交流线在谐波分析计算中采用 IEEE 电缆模型。该模型计算公式如下所示：

$$\begin{aligned} R_1(h) &= R_1(0.187 + 0.532h^{0.5}) & R_0(h) &= R_1(h) + h * (R_0 - R_1) \\ X_1(h) &= h * X_1 & X_0(h) &= h * X_0 \\ B_1(h) &= h * B_1 & B_0(h) &= h * B_0 \end{aligned}$$

式中：h 为谐波次数；

$R_1, R_0, X_1, X_0, B_1, B_0$ 分别为基波情况下交流线的正序、零序电阻、正序、零序

电抗以及正序、零序电纳。

数据信息栏

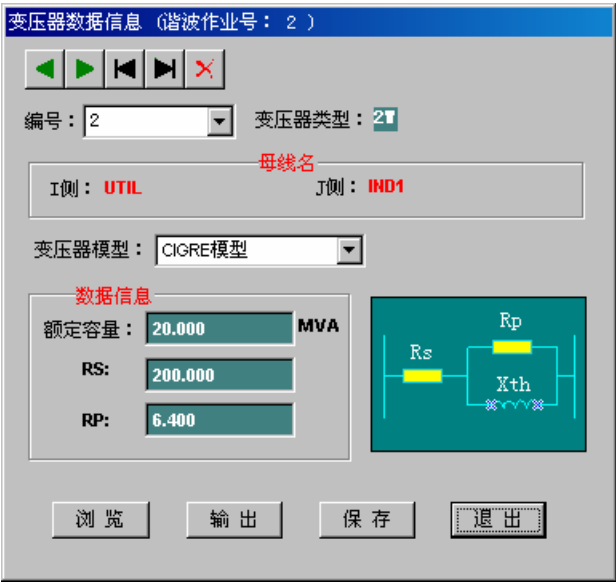
当交流线模型选择“分布参数模型”时，该栏数据有效。

- r1**: 单位公里的正序电阻，单位为欧姆/公里(Ohm/km);
- x1**: 单位公里的正序电抗，单位为欧姆/公里(Ohm/km);
- b1**: 单位公里的正序电纳，单位为 10⁻⁶ 西门子/公里(10⁻⁶Siem/km);
- r0**: 单位公里的零序电阻，单位为欧姆/公里(Ohm/km);
- x0**: 单位公里的零序电抗，单位为欧姆/公里(Ohm/km);
- b0**: 单位公里的零序电纳，单位为 10⁻⁶ 西门子/公里(10⁻⁶Siem/km)。

物理参数栏

2.2.2 变压器的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“变压器”按钮，弹出定义变压器的窗口，即可定义变压器谐波分析的相关数据。



基本项

编号: 变压器编号。该线路编号是从所基于的潮流作业中提取而来，只可下拉选择不可填写新的变压器编号。

变压器类型: 选取变压器编号后，自动显示变压器是两绕组(2W)还是三绕组(3W)。

I 侧母线名：选取变压器编号后，自动显示变压器 J 侧母线名。

J 侧母线名：选取变压器编号后，自动显示变压器 J 侧母线名。

变压器模型：在变压器模型下拉列表框中，显示的是谐波分析中该条变压器的模型，可以根据变压器的实际情况，以及用户需求选择模型：

①常规变压器模型：该变压器在谐波分析计算中采用常规变压器模型。该模型计算公式如下所示：

$$Z_{Tn} = \sqrt{n}R_{T1} + jnX_{T1}$$

式中： h 为谐波次数；

R_{T1} 为基波变压器的绕组电阻；

X_{T1} 为基波变压器的相应的序电抗。

②CIGRE 变压器模型：该变压器在谐波分析计算中采用 CIGRE 变压器模型。该模型计算公式如下。(注意：该模型需要填写数据信息栏中的相关信息。)

$$X_{Tk} = hX_{T1}$$

$$R_s = \frac{U_N^2}{S_N * FRS} \quad 90 \leq FRS \leq 110$$

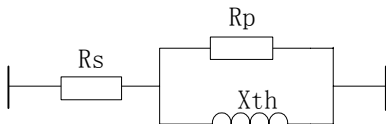
$$R_p = \frac{FRP * U_N^2}{S_N} \quad 13 \leq FRP < 30$$

式中： U_N 、 S_N 分别为变压器的额定电压和额定容量。

R_{T1} 为基波变压器的绕组电阻；

X_{T1} 为基波变压器的相应的序电抗。

其他项含义如下图所示：



③IEEE 变压器模型：该变压器在谐波分析计算中采用 IEEE 变压器模型。该模型计算公式如下所示：

$$Z_{Tn} = \sqrt{n}R_{T1} + jnX_{T1}$$

式中： h 为谐波次数；

R_{T1} 为基波变压器的绕组电阻；

X_{T1} 为基波变压器的相应的序电抗。

数据信息栏

当变压器模型选择“CIGRE 模型”时，该栏数据有效。

额定容量：变压器额定容量，单位为兆伏安(MVA)；

FRS：CIGRE 模型中的相关系数；

FRP：CIGRE 模型中的相关系数。

2.2.3 负荷的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“负荷”按钮，弹出定义负荷的窗口，即可定义负荷谐波分析的相关数据。

负荷数据信息 (谐波分析作业号: 3)

母线名及负荷号: IND1 -- 1

负荷模型: 串联模型 ☐ 集肤效应



负荷功率 (p. u.)

PA	0.717900	QA	5.708700
PB	0.717900	QB	5.708700
PC	0.717900	QC	5.708700

负荷数据信息

DK0	0.0000	DK1	0.0000
DK2	0.0000	DKE	0.0000

浏览 输出 保存 退出

基本项

母线名及负荷号：指定要编辑的负荷所在母线及负荷编号，整个窗口的内容将随它的改变而变化。

负荷模型：在负荷模型下拉列表框中，显示的是谐波分析中该负荷的模型，可以根据负荷的实际情况，以及用户需求选择模型：

①并联负荷模型：该模型最适合表示集中负荷。

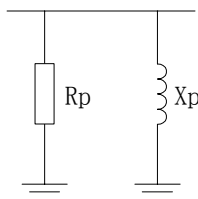


图 4-6 并联负荷模型

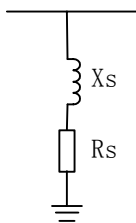
$$R(h) = R_p = V^2 / P$$

$$X(h) = hX_p = hV^2 / Q$$

式中： P 为该负荷的有功功率； Q 为该负荷的无功功率。

②含电动机负荷模型：该模型适合用于表示负荷中含有一部分电动机负荷。采用该模型时，必须保证该电动机负荷在基础数据种正确填写。

③RL 串联负荷模型：该模型最适合用于表示单一负荷。



$$R_s = \frac{V^2}{|S|^2} P$$

$$X_s = \frac{V^2}{|S|^2} Q$$

式中： S 为该负荷的视在功率； P 为该负荷的有功功率； Q 为该负荷的无功功率。

$$S = P + jQ ; |S|^2 = P^2 + Q^2。$$

④电阻、电抗混联支路：该模型适用于综合负荷。

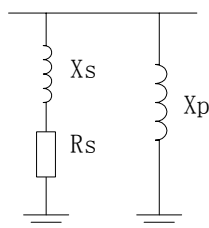


图 4-7 并联负荷模型

其电阻、电抗值分别为：

$$R_s = V^2 / P$$

$$X_s = 0.073hR_s$$

$$X_p = hR_s / (6.7\lg\phi_1 - 0.74)$$

$$\lg\phi_1 = Q / P$$

式中： P 、 Q 分别为负荷在基波时的“自然”有功、无功功率值。所谓“自然”功率值是指没有经过人工补偿时的原有的有功、无功功率值，也就是未计入人为改善功率因数而装设的电容器时的功率值。该模型来自于对中压网负荷的实际测量，并不一定适用于所有负荷。

⑤IEEE 变压器模型：该变压器在谐波分析计算中采用 IEEE 变压器模型。该模型计算公式如下所示：

$$Z_{Tn} = \sqrt{n}R_{T1} + jnX_{T1}$$

式中： h 为谐波次数；

R_{T1} 为基波变压器的绕组电阻；

X_{T1} 为基波变压器的相应的序电抗。

数据信息栏

当变压器模型选择“CIGRE 模型”时，该栏数据有效。

额定容量：变压器额定容量，单位为兆伏安(MVA)；

FRS: CIGRE 模型中的相关系数；
FRP: CIGRE 模型中的相关系数。

2.2.4 滤波器的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“**滤波器**”按钮，弹出定义滤波器的窗口，即可定义其相关数据。

滤波器数据信息 (谐波作业号: 2)

有效

谐波源编号: 1

母线名: IND1

连接方式: 三角形连接

滤波器参数

R1: 0.000000 ohm

L1: 0.000000 mH

C1: 0.000000 uF

R2: 0.000000 ohm

L2: 0.000000 mH

C2: 0.000000 uF

RG: 0.000000 ohm

XG: 0.000000 ohm

滤波器模型: High-Pass Damped



浏览

输出

保存

退出

基本项

滤波器编号: 滤波器编号。滤波器编号不能重复。

母线名: 滤波器所在母线名。

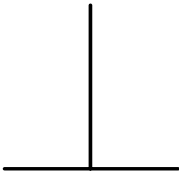
连接方式: 根据滤波器的实际连接方式选择。

滤波器模型: 在滤波器模型下拉列表框中，显示的是谐波分析中该滤波器的模型，可以根据滤波器的实际情况，以及用户需求选择模型：

滤波器模型表

模型编号	R1	L1	C1	R2	L2	C2
1 普通型	0	有效	有效	∞	∞	∞
2(一阶减幅)	有效	0	有效	∞	∞	∞
3(二阶减幅)	有效	0	有效	0	有效	0
4(三阶减幅)	0	有效	有效	有效	0	有效
5(单调谐)	有效	有效	有效	∞	∞	∞
6(High-Pass Undamped)	0	有效	有效	0	0	有效
7(High-Pass Damped)	有效	0	有效	有效	有效	0
8 (By-Pass)	0	有效	有效	0	有效	有效
9(C 型)	有效	0	有效	0	有效	有效

以上模型分别对应如下图：



可根据所选模型填写相应的滤波器参数。

2.2.5 谐波源的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“谐波源”按钮，弹出定义谐波源的窗口，即可定义谐波源的相关数据。

谐波源数据信息 (谐波作业号: 2)

☒ 有效

母线名: IND2

谐波源编号: 4

额定电流: 0.000000 kA

所在相位: ☒ A ☒ B ☒ C

序号	谐波次数	谐波分量: I _h /I	相角 (Deg)
1	5	20.00000	-180.00
2	7	14.00000	0.00
3	11	9.10000	-180.00
4	13	7.70000	7.70
5	17	5.90000	-180.00
6	19	5.30000	0.00
7	23	4.30000	-180.00
8	25	4.00000	0.00
9	29	3.40000	-180.00
10	31	3.20000	0.00
11	35	2.90000	-180.00

模板编辑应用

模板号: 0

编辑

应用

浏览

输出

保存

退出

基本项

- 母线名:** 选取该牵引负荷的高压母线母线名。
- 谐波源编号:** 填写该谐波源编号，若该谐波源在潮流计算中为负荷，则应和原负荷号相同。程序将从潮流计算中提取结果，所提取的电流值乘以谐波分量的百分比，即为各次谐波注入网络的谐波电流值。
- 额定电流:** 若该谐波源在潮流计算中没有定义，则需要填写该谐波源的额定电流。该数据乘以谐波分量的百分比，即为各次谐波注入网络的谐波电流值。
- 谐波源表:** 根据谐波源的实际情况填写谐波次数、谐波分量及相角。需要注意的是所填写的谐波分量为百分数。例如上图，5次谐波的谐波分量为20%。

2.2.7 谐波分析指标的定义

在前述谐波分析作业定义窗口的数据信息栏中，点击“谐波分析指标”按钮，弹出定义谐波分析指标的窗口，即可定义谐波分析指标的相关数据。其中分为 2 个页面：谐波电压限值页和谐波电流限值页。

谐波电压限值

谐波分析指标 (谐波作业号: 3)

谐波电压限值

谐波电流限值

基准电压 (kV)	THD (%)	奇次THD (%)	偶次THD (%)
0.380	5.000	4.000	2.000
6.000	4.000	3.200	1.600
10.000	4.000	3.200	1.600
35.000	3.000	2.400	1.200
66.000	3.000	2.400	1.200
110.00	2.000	1.600	0.800
220.00	2.000	1.600	0.800

恢复默认值

保存

退出

提供国家标准谐波电压限值，如有特殊述要可自行改动，并点击“保存”保存。如果需要恢复成国家标准谐波电压限值可点击“恢复默认值”。

谐波电流限值

谐波分析指标 (谐波作业号 : 3)

谐波电压限值

谐波电流限值

VB (kV)	SB (MVA)	S (MVA)	2 (A)	3 (A)	4 (A)	5 (A)	6 (A)	7 (A)	8 (A)	9 (A)	10
0.380	10	10.00	78.00	62.00	39.00	62.00	26.00	44.00	19.00	21.00	00
6.000	100	100.00	43.00	34.00	21.00	34.00	14.00	24.00	11.00	11.00	00
10.00	100	100.00	26.00	20.00	13.00	20.00	8.500	15.00	6.400	6.800	00
35.00	250	250.00	15.00	12.00	7.700	12.00	5.100	8.800	3.800	4.100	00
66.00	500	500.00	16.00	13.00	8.100	13.00	5.400	9.300	4.100	4.300	00
110.0	750	750.00	12.00	9.600	6.000	9.600	4.000	6.800	3.000	3.200	00
220.0	2000	2000.0	12.00	9.600	6.000	9.600	4.000	6.800	3.000	3.200	00

* VB:标准电压 * SB:基准短路容量 * S:公共连节点的最小短路容量 * 其余为该次谐波的电流允许值

公共连接点供电容量 : 100.000 MVA

用电协议容量 : 100.000 MVA

计算

恢复默认值

保存

退出

提供国家标准谐波电流限值，如有特殊述要可自行改动，点击“**计算**”后，程序可根据改动后的公共连接点供电容量、用电协议容量以及短路容量进行谐波电流值的计算。该计算公式遵循《电能质量公用电网谐波》(国标 GB/T14549-93)的标准中的计算公式。如果需要恢复成国家标准谐波电压限值可点击“**恢复默认值**”。

3 文本方式下的谐波分析计算

(1) 计算准备

在进行谐波分析计算前，需做好以下工作：

① 成功进行基础潮流作业的计算

基础潮流是谐波分析计算的基础，它确定了谐波分析计算的电网结构和基本运行方式，为谐波分析计算得以顺利进行打好了基础。因此，要求在进行谐波分析计算之前，必须成功进行基础潮流计算。

② 给出谐波分析作业的数据和信息

在 PSASP 主画面中，点击“文本支持环境”按钮，进入文本环境窗口，再点击“计算”下拉菜单中的“谐波分析”，弹出谐波分析计算信息窗口：

谐波分析计算信息

作业定义

作业号：

2

潮流作业：

1

描述

浏览

删除

刷新

编辑...

计算功能

☒ 频率扫描

☐ 单相计算

☐ 三相对称计算

☐ 三相不对称计算

基准频率

☒ 50Hz

☐ 60Hz

控制信息

集肤效应 ☐ 交流线 ☐ 变压器 ☐ 负荷

交流线模型

不统一指定模型

变压器模型

不统一指定模型

负荷模型

不统一指定模型

数据信息

交流线

变压器

负荷

滤波器

谐波源

牵引负荷谐波源

谐波分析指标

从其它作业导入

频率扫描参数

扫描起始频率

50

扫描间隔频率

25

扫描结束频率

2500

频率扫描母线

IND1

转移阻抗母线

IND1

计算

取消

按照第二章的步骤和要求，进行谐波分析作业的定义。其中潮流作业号、参与计算的数据信息如交流线、变压器、负荷和滤波器必须填写；如果选择频率扫描功能，则必须填写频率扫描参数；如果选择谐波潮流计算功能，必须填写谐波源数据。

(2) 执行计算

给出谐波分析作业信息后：

- ① 点击“**计算**”按钮，执行该作业的谐波分析计算。
- ② 弹出计算过程信息窗口，其中列出各个切除方案的计算收敛情况。在计算过程中，按“Esc”键可中止计算。
- ③ 退出计算过程窗口，返回谐波分析计算信息窗口。
- ④ 点击“**取消**”按钮，退出谐波分析计算信息窗口。

计算结束后关闭计算窗口，即完成该作业的计算。对于每一个谐波分析作业，计算后，其结果均保存在计算结果库中。

4 谐波分析结果编辑和输出

4.1 计算结果输出概述

(1) 谐波分析输出的功能特点

一个谐波分析作业成功执行后，则该作业号的计算结果即保存下来。若不删除，任何时候都可以查看。

所保存的计算结果是基本且完备的数据，查看时，可根据需要做进一步编辑。在输出形式上有报表、文件、曲线等。归纳起来，有以下功能和特点：

谐波分析结果报表的灵活编辑

- ① 可按区域、电压等级输出。
- ② 输出范围可选：可指定全网，区域，电压等级或某些支路和母线集合。
- ③ 输出的目标和对象可选：通过该选择可确定输出内容的大致目标。如有关母线(包括发电机和负荷)，有关交流线，有关变压器等，以便进一步细选。
- ④ 报表的具体项目和格式可选：在输出的内容确定之后，可进入报表具体项目的选择，其中除常用的固定表格外，还设有用户自制的方式，即由用户决定表格的项目和次序。

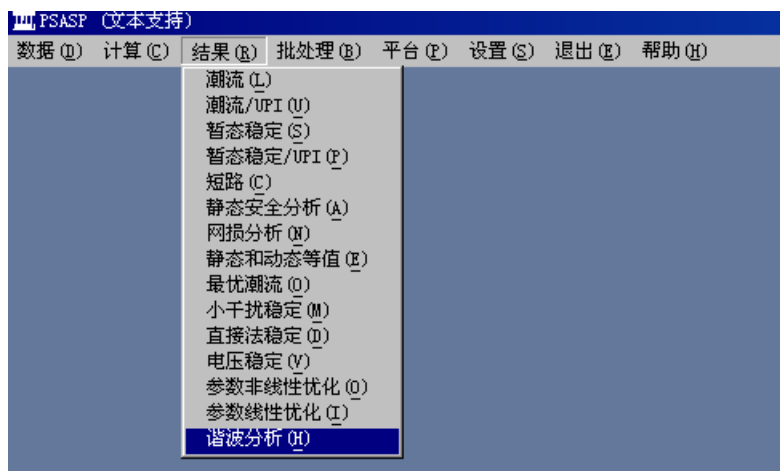
- ⑤ 输出方式多样：可以固定格式报表、Excel 报表和文本文件这 3 种形式输出。

谐波分析中的曲线输出

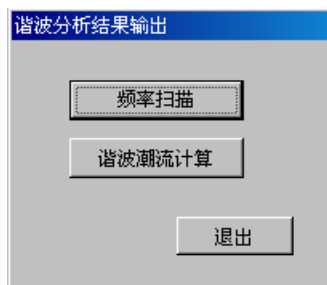
- ① 可查询或输出各条母线的畸变波形曲线，可以直接打印或保存为图形文件。
- ② 对于频率扫描作业，可以输出

4.2 计算结果的编辑和输出

在文本环境窗口中，点击“结果”，下拉各种计算结果命令如下：



点击“谐波分析”，则弹出谐波分析计算结果输出的窗口。



其中包括：

- 频率扫描
- 谐波潮流计算

4.2.1 频率扫描输出

(1) 进入频率扫描输出环境

在谐波分析计算结果输出窗口中，点击“频率扫描”按钮，进入频率扫描输出窗口：

频率扫描结果输出

作业号: 1 作业描述

单位

☒ p.u.
☐ kV/ohm

输出方式

☒ 报表 ☐ Excel报表
☐ 图表 ☐ MatLab曲线

输出内容

☒ Z_h ☐ θ_h
☐ R_h ☐ X_h
☐ R_h-X_h 曲线 ☒ $V\%$

☐ 输出至文件

选择 浏览

输出 退出

(2) 输出基本信息

作业号: 从成功计算的谐波分析作业中选择(其中只列出了计算功能为频率扫描的作业)。

作业描述: 可查看或编辑该谐波分析作业描述。

单位: 输出量单位选择。 p.u.: 标么值; kV/ohm: 有名值。

(3) 输出内容选择

在“频率扫描结果输出”窗口的输出内容栏中共有 5 项。

- ① 阻抗幅值-频率: 输出频率扫描结果, 对应频率下的阻抗幅值。
- ② 阻抗相角-频率: 输出频率扫描结果, 对应频率下的阻抗相角。
- ③ 阻抗实部-频率: 输出频率扫描结果, 对应频率下的电阻。
- ④ 阻抗虚部-频率: 输出频率扫描结果, 对应频率下的电抗。
- ⑤ 阻抗实部-虚部: 该内容只提供图表输出, 输出频率扫描结果电阻-电抗曲线。

(4) 输出方式选择

① 报表

选择后点击“输出”按钮, 可直接浏览和打印所生成的报表。

② Excel 报表

选择后点击“输出”按钮, 输出 Excel 报表, 可浏览、保存和打印该报表, 还可进一步利用 Excel 其它功能进行数据的统计分析。

③ 输出至文件

将报表输出至文本文件。

点击“**选择**”按钮，可创建或选择报表文件名；
点击“**浏览**”按钮，可浏览已生成的报表文件。

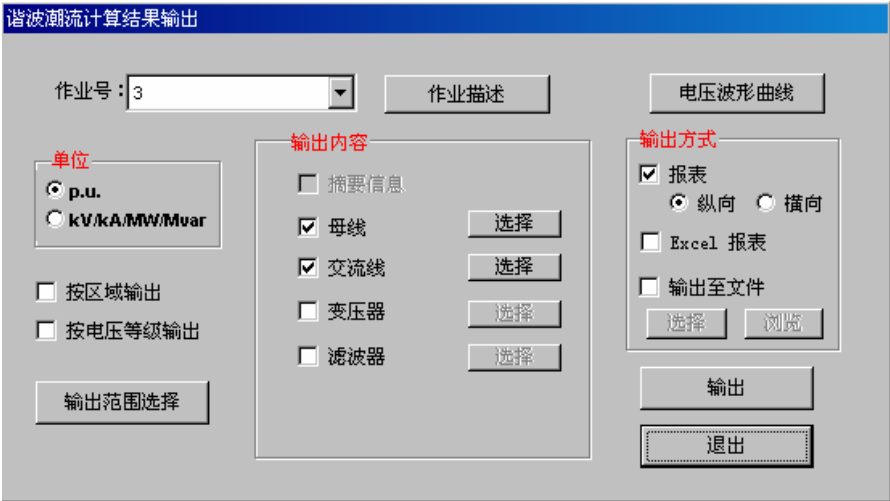
(8) 报表输出

根据所选择的作业，单位，输出范围和内容并按照输出方式的选择，或直接浏览、打印所生成的报表，或将报表输出至 Excel，或将报表输出至指定的文本文件。

4.2.2 谐波潮流计算输出

(1) 进入谐波潮流计算输出环境

在谐波分析计算结果输出窗口中，点击“**谐波潮流计算**”按钮，进入谐波潮流计算输出窗口：



(2) 输出基本信息

作业号：从成功计算的谐波分析作业中选择(其中只列出了计算功能为频率扫描的作业)。

作业描述：可查看或编辑该谐波分析作业描述。

单位：输出量单位选择。 p.u.：标么值；kV/ohm：有名值。

按区域输出：是否按区域输出选择。☒：是；☐：否。

按电压等级输出：是否按电压等级输出选择。☒：是；☐：否。

(3) 输出范围选择

点击“**输出范围选择**”按钮，弹出输出范围选择窗口：



在该窗口中可通过区域、电压等级和不同元件等方式加以选择，所选输出范围的最终结果是母线和支路（线路和变压器）的集合。

具体选择方法如下：

- ① 全网：选择结果是全网所有的母线和支路。此时其它项无效。
- ② 区域：选择的对象是区域号，选择结果是被选区域内的所有母线和支路。
- ③ 电压等级：选择的对象是电压等级，选择结果是被选电压等级的母线和支路。
- ④ 母线：选择的对象是母线，选择结果是被选的母线。
- ⑤ 交流线：选择的对象是交流线，选择结果是被选的交流线。
- ⑥ 变压器：选择的对象是变压器，选择结果是被选的变压器。
- ⑦ 滤波器：选择的对象是滤波器，选择结果是被选的滤波器
- ⑧ 越限：选择结果是上述所选元件中越限的元件。

除第一项选择全网外，其他各项选择结果的总和，构成最终的输出范围。

(4) 输出内容选择

在“谐波潮流计算结果输出”窗口的输出内容栏中共有 4 项，各项报表中所含的具体项目又是可选的。因此，选中某项后,还需点击其相应的“**选择**”按钮，进一步确定报表中所含具体项的内容和次序。

① 母线

选中后，点击“**选择**”按钮，弹出内容选择窗口：



报表变量： 在报表变量栏中列出的可供选择的变量如下：

V_h	各次谐波母线电压幅值
$IHD(V_h\%)$	第 h 次谐波含有率
θ_h	各次谐波母线电压相角
THD	总谐波畸变率
ASUM	母线总电压幅值
RMS	母线电压均方根
CF	波峰系数
HVF	谐波电压系数

表 1—表 4： 固定表。点击后，其内容和次序如报表变量栏中所示。

自制表： 用户自制表。可在报表变量栏中选择变量的内容和次序。点击“清除”按钮可清除所选的变量。

② 交流线

选中后，点击“选择”按钮，弹出内容选择窗口：



报表变量：在报表变量栏中列出的可供选择的变量如下：

I_h	各次谐波交流线电流幅值
$IHD(I_h\%)$	第 h 次谐波含有率
THD	总谐波畸变率
ASUM	交流线总电流幅值
RMS	交流线电流均方根

表 1—表 3：固定表。点击后，其内容和次序如报表变量栏中所示。

自制表：用户自制表。可在报表变量栏中选择变量的内容和次序。点击“清除”按钮可清除所选的变量。

③ 变压器

选中后，点击“选择”按钮，弹出内容选择窗口：



报表变量：在报表变量栏中列出的可供选择的变量如下：

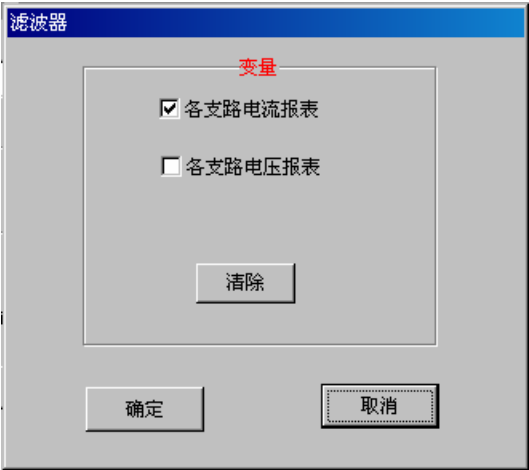
I_h	各次谐波变压器电流幅值
$IHD(I_h\%)$	第 h 次谐波含有率
THD	总谐波畸变率
ASUM	变压器总电流幅值
RMS	变压器电流均方根
K 因数	变压器 K 因数

表 1—表 3：固定表。点击后，其内容和次序如报表变量栏中所示。

自制表：用户自制表。可在报表变量栏中选择变量的内容和次序。点击“清除”按钮可清除所选的变量。

④ 滤波器

选中后，点击“选择”按钮，弹出内容选择窗口：



滤波器只有两种固定格式的输出，分别为各支路电流报表和各支路电压报表。

(5) 输出方式选择

① 报表

选择后点击“输出”按钮，可直接浏览和打印所生成的报表。

纵向：报表按纸张纵向输出；

横向：报表按纸张横向输出。

② Excel 报表

选择后点击“**输出**”按钮，输出 Excel 报表，可浏览、保存和打印该报表，还可进一步利用 Excel 其它功能进行数据的统计分析。

③ 输出至文件

将报表输出至文本文件。

点击“**选择**”按钮，可创建或选择报表文件名；

点击“**浏览**”按钮，可浏览已生成的报表文件。

(6) 报表输出

根据所选择的作业，单位，输出范围和内容并按照输出方式的选择，或直接浏览、打印所生成的报表，或将报表输出至 Excel，或将报表输出至指定的文本文件。

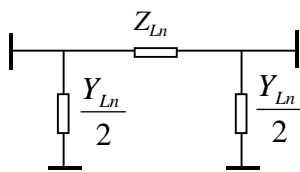
附录 A 输电线路分布参数模型

输电线路是分布参数电路，在基波计算时，等值电路参数常常为分布参数的简单集中，即：

$$Z_{L1} = (r_{01} + jx_{01})l$$

$$Y_{L1} = jb_{01}l$$

式中： r_{01} 、 x_{01} 和 b_{01} 分别为线路单位长度的基波电阻、电抗和电纳。



交流线的谐波等值电路

这种集中参数等值电路仅适用于距离较短的线路，如架空线路小于 200-300km，电缆线路小于 50-100km。在谐波计算中，由于线路的分布特性比基波时更显著，因而每个等值 π 所能代表的线路距离将大为缩短，如果架空线路在基波时能够用 π 等值的长度为 300km，则在 h 次谐波时仅为 $\frac{300}{h}$ km。因此在谐波计算中更多的使用分布参数等值电路，只有在线路较短，或谐波次数不高时才使用集中参数等值电路。

对于分布参数等值电路，由于长线路需要多个 π 等值，而且对于同一线路，各次谐波所需的 π 模型的数目也不同。此时，采用双曲函数计算等值电路参数更为便利，其参数为：

$$Z_{Lh} = Z_{Ch} \text{sh} \gamma_h l$$

$$Y_{Lh} = 2 \frac{\text{ch} \gamma_h l - 1}{Z_{Ch} \text{sh} \gamma_h l}$$

式中： Z_{Ch} 、 γ_h 分别为 h 次谐波时线路的特征阻抗和传播常数，均为复数。

Z_{Ch} 和 γ_h 可按式求得：

$$Z_{Ch} = \sqrt{z_{0h} / y_{0h}}$$

$$\gamma_h = \beta_h + j\alpha_h = \sqrt{z_{0h} y_{0h}}$$

式中： Z_{oh} 、 Y_{oh} 分别为 h 次谐波时线路单位长度的阻抗和导纳。

线路的电感、电容可认为是与频率无关的常量，因而其谐波电抗和电纳等于其基波电抗和电纳乘以谐波次数 h 。因而线路单位长度的谐波参数为：

$$y_{0h} = jhb_{01} \quad \text{S/km}$$

$$z_{0h} = r_{0h} + jhx_{01} \quad \Omega/\text{km}$$

若考虑集肤效应，线路的 h ($h \neq 1$) 次谐波单位长度电阻值可由下式：

$$\gamma_{0h} = 0.288\gamma_{01} + 0.138\sqrt{h\gamma_{01}} \quad \Omega/\text{km}$$

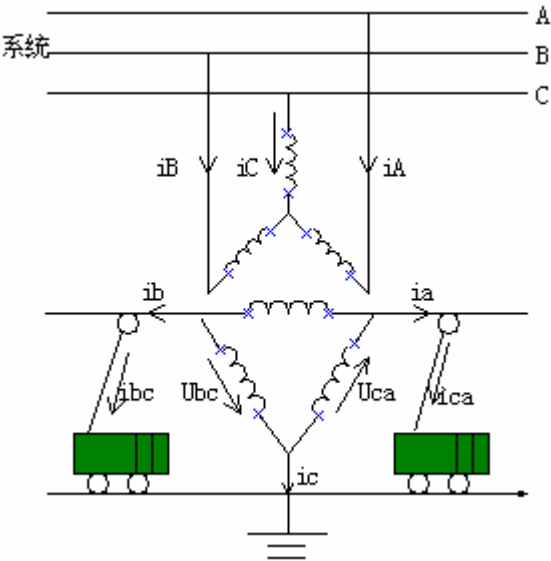
求得。

附录 B 电力牵引负荷

当前，电气铁道牵引系统采用的牵引变压器主要有 4 种，即 Y-d11 普通三相变压器、V-v 三相变压器、T 接线的斯科特(scott)变压器以及阻抗平衡型变压器。前两种高低压之间为三相量的变换，后两种为三相量与两相量的变换。此外，还有几种特殊接线的牵引变压器。电气铁道作为两相或单相不对称的谐波负荷，正是经过各种牵引变压器的变换，在其高压侧将三相不平衡的谐波电流以及基波负序电流注入电力系统的。在这里，将把基波作为谐波的特例，进行统一计算分析。

(1)牵引变压器为 Y-d11 接线

下图为采用 Y-d11 牵引变压器的牵引供电系统图。假定在换相过程中变压器的高压侧与系统同相连接。



Y-d11 牵引变压器的牵引供电系统图

设系统电压为三相对称的正弦波，以供电臂超前相电压 \dot{U}_{bc} 为参考，则两臂 h 次谐波电流的复数形式为：

$$\dot{I}_{bh} = I_{bh} e^{j\varphi_h}$$

$$\dot{I}_{bh} = -I_{ah} e^{j(\varphi_h - h*120^\circ)}$$

$$\dot{I}_{ch} = -(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh})$$

式中： φ_h 及 ϕ_h 为 b 臂和 a 臂参照于各自供电臂电压的 h 次谐波初相角。

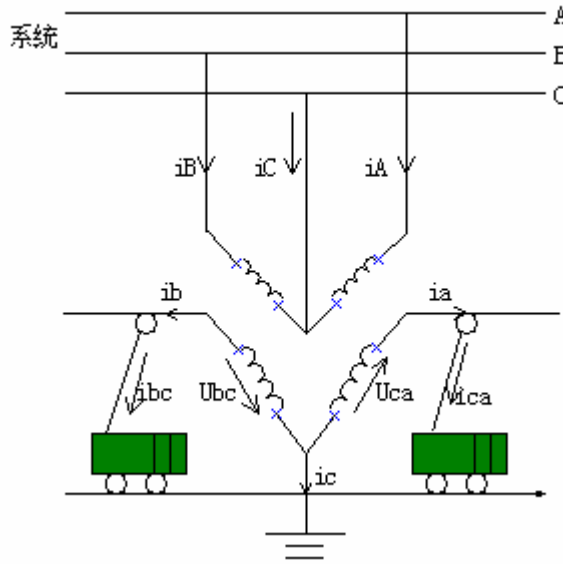
当 $h=1$ 时，上式为基波电流和基波功率因数角。把各次三相谐波放在各自的复数平面上，用对称分量法分解成各序分量，然后根据牵引变压器的接线方式和变比对各次谐波的作用进行计算，得到高压侧输入供电系统的各序分量如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{H+} \\ \dot{I}_{H-} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} 1 & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{-j60^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

合成为各相谐波电流为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{Ah} \\ \dot{I}_{Bh} \\ \dot{I}_{Ch} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

(2)牵引变压器为 V-v12 接线



V-V 牵引变压器的牵引供电系统图

上图为采用 V-v12 牵引变压器的牵引供电系统图。假定在换相过程中变压器的高压侧与系统同相连接，两供电臂输入牵引变压器的 h 次谐波电流为：

$$\dot{I}_{bh} = I_{bh} e^{j\varphi_h}$$

$$\dot{I}_{bh} = -I_{ah} e^{j(\phi_h - h*120)}$$

$$\dot{I}_{ch} = -(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh})$$

式中： φ_h 及 ϕ_h 为 b 臂和 a 臂参照与各自供电臂电压的 h 次谐波初相角。

用对称分量法求得输入供电系统的谐波电流及序分量为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{H+} \\ \dot{I}_{H-} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} & j \\ e^{-j30^\circ} & -j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{Ah} \\ \dot{I}_{Bh} \\ \dot{I}_{Ch} \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

输入系统的谐波电流各序分量的数值与牵引变压器接线方式无关, 故两种牵引变压器的计算公式相同, 而其相位与接线方式相关, 故两者不同。

Y-d11 及 V-v12 牵引变压器高压侧输入系统的不平衡谐波的特点:

①各次谐波, 包括 3 及 3 的倍数次, 都要经变压器输入系统, 输入系统的特征谐波全部为奇次谐波。

②当两臂有机车时, 输入系统的所有不平衡电流(包括基波)分为 3 类, 令 $m=0,1,2,\dots$, 则: $h=3m+1$ 次为正序性不平衡谐波(相序为 A, B, C); $h=3m+2$ 次为负序性不平衡谐波(相序为 A, C, B); $h=3m+3$ 次, 当两臂电流的初相角相同时($\varphi_h = \phi_h$), 为零序性不平衡谐波(相序为 A, B, C), 其相角两相同相, 一相反相。当一臂有机车时, 各次谐波均为零序性不平衡谐波。

③各次三相不平衡谐波电流均由谐波序电流组成, 都可分解为正序谐波分量和负序谐波分量, 而零序谐波分量为 0。在这种两相或单相负荷的供电方式下, 低压侧各次三相谐波电流的相量和为零, 均不含零序分量。故变压器绕组对机车的谐波电流不起任何阻挡作用。

④各次三相谐波电流的相量和为零, 组成闭合三角形, 因而可以用谐波线电流的数值直接按下式计算谐波的序分量电流的数值:

$$I_{h(+or-)} = \sqrt{(I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 + I_{Ch}^2)/6 \pm 2\sqrt{S_h(S_h - I_{Ah})(S_h - I_{Bh})(S_h - I_{Ch})}/3} \quad (4-51)$$

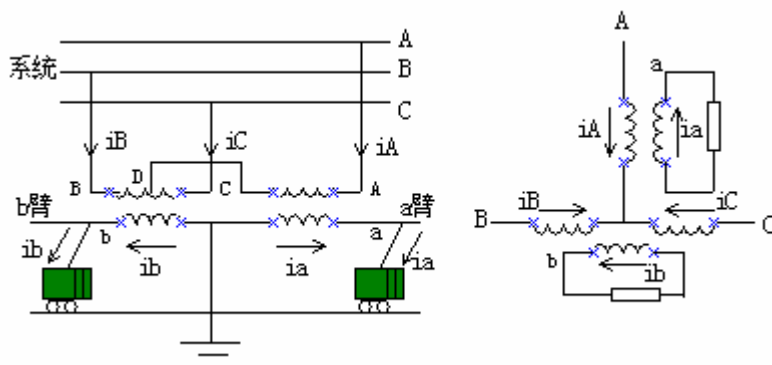
式中: $S_h = (I_{Ah} + I_{Bh} + I_{Ch})/2$ 是三相谐波线电流组成的闭合三角形的半周长。

对于正序性不平衡谐波($3m+1$ 次), 根号内取正为正序分量, 取负时为负序分量, 故 $I_{h+} > I_{h-}$; 对于负序性不平衡谐波($3m+2$ 次), 根号内取正为负序分量, 取负时为正序分量, 故 $I_{h+} < I_{h-}$; 对于零序性不平衡谐波($3m+3$ 次), 根号内第二项为零, 故

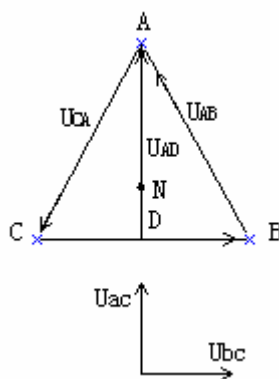
$$I_{h+} = I_{h-}。$$

(3) 牵引变压器为斯科特(Scott)接线

T 型接线的斯科特变压器为一次侧三相系统和二次侧两相系统之间的变换变压器，其原理接线图、电压相量图如下图所示：



Scott 牵引变压器的牵引供电系统图



Scott 牵引变压器电压相量图

一次侧三相绕组不对称，匝数关系为 $W_{BD}=W_{DC}$ ， $W_{AD} = \sqrt{3}W_{BC} / 2$ ，中性点 N 位于绕组 AD 的 $1/3$ 处 ($W_{DN}=W_{AD}/3$)。二次侧两绕组的匝数相等 $W_{bc}=W_{ac}$ 。高压侧接供电系统三相电压，中性点不接地，低压侧两相向牵引网和电力机车供电。假定系统的电压为三相对称的正弦波，则低压侧两相系统的电压滞后于 \dot{U}_{ac} 90° ，组成 α 、 β 两相系统。两供电臂输入牵引变压器的各次谐波以超前相电压 \dot{U}_{ac} 为参考，则 h 次谐波电流的复

数形式为：

$$\begin{aligned}\dot{I}_{ah} &= I_{ah} e^{j\varphi_h} \\ \dot{I}_{bh} &= I_{bh} e^{j(\phi_h - h \cdot 90^\circ)}\end{aligned}$$

式中： φ_h 及 ϕ_h 为参照于各自供电臂电压的 h 次谐波初相角。

设变压器 T 接绕组的变比为 $K_T = W_{AD}/W_{ac}$ ，利用 α 、 β 、0 两相系统转换至 A、B、C 三相系统的关系式，并考虑到高压侧中性点 N 不接地，不存在零序谐波分量，可得高压侧输入供电系统的三相谐波电流及序分量为：

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{I}_{Ah} \\ \dot{I}_{Bh} \\ \dot{I}_{Ch} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2K_T} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{I}_{H+} \\ \dot{I}_{H-} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2K_T} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

当变比采用变压器一、二次侧额定线电压之比 K 时， $K = W_{BC}/W_{bc} = 2K_T/\sqrt{3}$ ，则上列各式中 $K_T = \sqrt{3}K/2$ 。

电气铁道经斯考特牵引变压器输入供电系统的三相谐波电流具有以下特点：

①各次谐波电流均要经牵引变压器输入电力系统，输入系统的特征谐波为全部奇次谐波；

②当两臂有机车且低压侧两相谐波负荷不平衡时，经牵引变压器输入电力系统的谐波电流为三相不平衡谐波，包括基波在内，可分为 4 类。令 $m=0, 1, 2\cdots$ ，则：

$h=4m+1$ 次 ($n=1,5,9,\dots$) 为正序性不平衡谐波；

$h=4m+3$ 次 ($n=3,7,11,\dots$) 为负序性不平衡谐波；

$h=4m+2$ 和 $h=4m+4$ 次 ($n=2,4,6,8,\dots$)，当 $\varphi_h = \phi_h$ 时为零序性不平衡谐波，而这两类谐波在特征谐波中是不存在的，因此不予讨论。

可以看出经斯考特牵引变压器输入系统的谐波相序特征与常规的三相变压器不

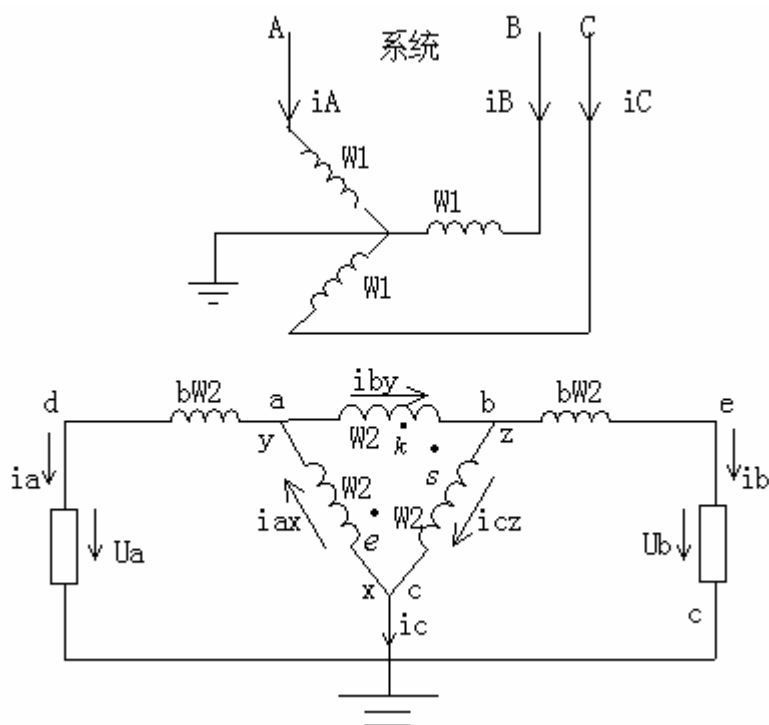
同。

③当低压侧两相谐波负荷平衡时输入供电系统的前两类谐波电流成为三相平衡的谐波。

④各次不平衡谐波均由正、负序分量组成，不含零序分量。

(4)阻抗匹配平衡型牵引变压器

阻抗匹配平衡型变压器是我国自行研制生产的电气铁道牵引变压器，可看作由 Y-d 变压器发展而来，适用于高压侧中性点接地或不接地系统，其高压侧三相绕组接线与普通 Y/Δ 接线变压器的星形接线方式完全一样，只是在低压侧(三角形接线侧)三相铁芯中间芯柱的一相绕组上多了两个外延支臂，每个支臂的匝数为该三角形相绕组匝数的 $(\sqrt{3}-1)/2$ 倍。其原理接线图如下所示：



阻抗平衡牵引变压器电压相量图

二次侧采用单相(by 相)双向延伸绕组，其匝数均为 $bW_2 = \frac{\sqrt{3}-1}{2}W_2$ ，设 $K_\phi = W_1/W_2$ ，则输出两相电压 $U_a = U_b = \sqrt{3}/2 U_{1\phi} / K_\phi$ ，且 U_a 超前 $U_b 90^\circ$ 。

可以看出, 阻抗匹配平衡型牵引变压器其一次侧输入与二次侧输出之间是三相量与两相量的变换, 系统线电压与变压器输出电压的变比为 $K = \sqrt{2}K_\phi$ 。

采用阻抗参数的匹配, 使从三角绕组看入的三相等值阻抗比为 $\dot{I}:\dot{k}:\dot{s}=1:(\sqrt{3}+1):1$, 从下面的计算分析可以看出, 一次侧 Y 绕组的零序电流为零, 中性点接地时不存在中线电流。

以 \dot{U}_a 为参考, 两供电臂谐波电流如下:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{ah} &= I_{ah} e^{j\varphi_h} \\ \dot{I}_{bh} &= I_{bh} e^{j(\phi_h - h*90^\circ)}\end{aligned}$$

从三角绕组看入的三相等值谐波阻抗比与基波相同, 为 $1:(\sqrt{3}+1):1$ 。由方程组:

$$\begin{aligned}\dot{I}_{axh} - \dot{I}_{byh} &= \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{byh} - \dot{I}_{czh} &= \dot{I}_{bh} \\ \dot{I}_{czh} - \dot{I}_{axh} &= \dot{I}_{ch} \\ \dot{I}_{axh} + (\sqrt{3}+1)\dot{I}_{byh} + \dot{I}_{czh} &= 0\end{aligned}$$

解得三角绕组的三相电流为:

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \dot{I}_{axh} \\ \dot{I}_{byh} \\ \dot{I}_{czh} \end{bmatrix} &= \frac{1}{2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+1 & \sqrt{3}-1 \\ -(\sqrt{3}-1) & \sqrt{3}-1 \\ -(\sqrt{3}-1) & -(\sqrt{3}+1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{3}-1}{6} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}\end{aligned}$$

第一项为三相阻抗平衡时仅含正、负序分量的绕组电流。正、负序电流分量为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{axh+} \\ \dot{I}_{axh-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j60^\circ} \\ 1 & e^{-j60^\circ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

第二项为与 by 相延伸绕组零序磁通势平衡的零序电流分量 $\dot{I}_{\Delta h} = -\dot{I}_{byh}/\sqrt{3}$ 。该不对称绕组的零序磁通势正好由三角绕组的零序磁通势相平衡。

通过方程组：

$$\begin{aligned} W_1 \dot{I}_{Ah} &= W_2 \dot{I}_{axh} \\ W_1 \dot{I}_{Bh} &= W_2 \dot{I}_{byh} - (\sqrt{3}-1)W_2 (\dot{I}_{ah} - \dot{I}_{bh})/2 \\ W_1 \dot{I}_{Ch} &= W_2 \dot{I}_{czh} \end{aligned}$$

可得一次侧 Y 绕组的电流为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{Ah} \\ \dot{I}_{Bh} \\ \dot{I}_{Ch} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} (\sqrt{3}+1)/2 & (\sqrt{3}+1)/2 \\ -1 & 1 \\ -(\sqrt{3}+1)/2 & -(\sqrt{3}+1)/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

正、负序分量为：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{H+} \\ \dot{I}_{H-} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} e^{-j15^\circ} & e^{j75^\circ} \\ e^{j15^\circ} & e^{-j75^\circ} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix}$$

在实际的电铁谐波分析计算中，已知的是 A 臂和 B 臂的谐波电流值，该谐波电流值，来源于两个渠道：一是通过实测波形分析得到；二是通过模型仿真分析得到。无论从何种途径得到，其谐波电流值都不会是完全精确的，这是由于电铁的运行是十分复杂的。首先，不同型号的电力机车产生的谐波是不同的，其次在不同的时刻，供电臂上的电力机车的数量是不定的，有时某个供电臂上没有机车，有时又有多个机车。

在谐波分析计算程序中，对于阻抗匹配平衡牵引变压器、V-v 接线牵引变压器以及 Scott 牵引变压器，由于还没有建立其变压器的数学模型，尚不能在谐波计算中将其相应的谐波模型记入整个系统。因此在这里，主要利用的是牵引变压器电流传输模型，将其二次侧的谐波电流值通过电流传输公式，根据变压器类型、变比以及换相信息，

变换到一次侧，得到一次侧的电流值。将牵引变压器的一次侧作为谐波源的输入侧，换算过来的电流值作为谐波源的各次谐波值，然后再进行系统谐波潮流计算。