

## 单相整流负荷谐波功率需求建模分析

张航<sup>1</sup>, 毛欣<sup>1</sup>, 王佳佳<sup>2</sup>, 魏能峤<sup>2</sup>, 周念成<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司永川供电分公司, 重庆 400044;  
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 单相整流负荷作为典型的谐波源会对电网产生谐波污染, 引起附加的谐波功率损耗。基于单相整流负荷工作原理, 分析其各次谐波有功和无功功率流向特点, 分别建立单相不控和相控整流负荷的功率需求模型。该模型计及整流器端电压和电流各次谐波分量之间的耦合关系, 实现了整流负荷谐波功率的精确计算。利用仿真分析验证了该模型推导的正确性, 并进一步定义了谐波有功和无功功率导纳矩阵。通过分析矩阵元素物理意义和幅值变化规律, 确定单相整流负荷端电压各谐波分量对谐波功率的贡献程度。

**关键词:** 整流负荷; 谐波耦合; 功率需求模型; 导纳矩阵; 单相

### Modeling and analysis for harmonic power demand of single-phase rectification loads

ZHANG Hang<sup>1</sup>, MAO Xin<sup>1</sup>, WANG Jiajia<sup>2</sup>, WEI Nengqiao<sup>2</sup>, ZHOU Niancheng<sup>2</sup>

(1. Power Supply Bureau of Yongchuan, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** As a typical harmonic source, the single-phase rectification loads will produce harmonic pollution into power grid, which will further cause the harmonic power loss. Based on the operation principle of the single-phase rectification loads, their harmonic active and reactive powers and the flow direction are investigated. In consideration of the coupled relationship between the terminal current and voltage harmonics of rectifiers, their power demand models are established to calculate the harmonic power accurately. The correctness of the model is verified by the simulation. On this basis, the admittance matrices of harmonic active and reactive power are defined. And the contribution degree that the voltage harmonics of single-phase rectification loads act on their harmonic powers is studied through the analysis of the physical significance and the elements of admittance matrices.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A107).

**Key words:** rectification loads; harmonic coupled; power demand model; admittance matrix; single phase

中图分类号: TM714

文章编号: 1674-3415(2015)20-0008-07

## 0 引言

随着电力电子技术的发展, 配电系统中非线性整流设备越来越多, 对电网产生不容忽视的谐波污染<sup>[1-5]</sup>。其中, 单相整流负荷产生的谐波电流经电网传递后, 会产生附加电能损耗, 危害电网监控、计量设备正常工作, 对电力系统的节能高效运行产生不利影响<sup>[6-8]</sup>。如何有效地确定整流负荷的谐波功率及其流向, 对评估负荷谐波损耗、合理设计电能计费标准以及计算含谐波源电网的谐波潮流分布具有

重要意义<sup>[9-10]</sup>。因此, 需要深入研究非线性整流负荷的谐波功率特性及解析计算方法。

采用时域仿真<sup>[11]</sup>和频域解析<sup>[3,12-13]</sup>均可对整流负荷进行谐波建模分析, 但考虑到其交流侧谐波电压电流之间的时域非线性耦合关系, 频域方法更能直观地表征出整流装置谐波产生机理。文献<sup>[12-13]</sup>根据单相不控和相控整流负荷运行特性, 建立了频域谐波耦合导纳矩阵模型, 将整流负荷的时域非线性转换成频域线性矩阵形式, 实现谐波电流的解析计算, 但未对单相整流负荷的谐波功率特性及其解析建模进行分析。目前, 对单相(非线性)整流负荷谐波功率及其流向的研究相对较少, 文献<sup>[14]</sup>针对单相半波整流电路, 利用时域仿真研究了整流负荷

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2011AA05A107)

的谐波功率特点, 但未给出非线性整流负荷的谐波功率解析式。文献[15]对三相整流电路的功率流向及功率计算进行分析, 探讨了电源含与不含谐波情形下系统总有功功率与基波功率的关系。文献[16]在分析瞬时功率构成基础上, 推导了三相电压、电流其中之一或两者都发生畸变时的瞬时功率表达式。但是, 文献[15-16]的谐波功率计算均未考虑整流负荷端电压电流各次谐波分量间的耦合关系, 无法定量地准确解析非线性负荷的谐波功率。

本文通过研究单相整流负荷各次谐波有功和无功功率及其流向特点, 构建计及谐波耦合的单相不控和相控整流负荷功率需求模型。通过仿真分析, 验证该模型的正确性。最后, 定义谐波有功和无功功率导纳矩阵, 分析该矩阵元素的物理意义和幅值变化规律, 探讨单相整流负荷端电压不同谐波成分对其谐波功率的贡献程度。

## 1 单相整流负荷谐波功率及其流向分析

配电系统中常见的谐波源负荷, 如台式计算机、紧凑型荧光灯、洗衣机、微波炉等, 多为非线性单相整流负荷, 其等效电路<sup>[12-13,17]</sup>如图1所示。电网电压经单相不控和晶闸管相控桥式整流电路后, 为直流侧阻容负载( $RC$  并联)和阻感负载( $RL$  串联)供电, 生成脉动的直流电流。该电流再经整流电路与电网耦合, 导致负荷交流电流发生谐波畸变, 谐波电流经电网传递后, 将使系统产生谐波功率损耗。

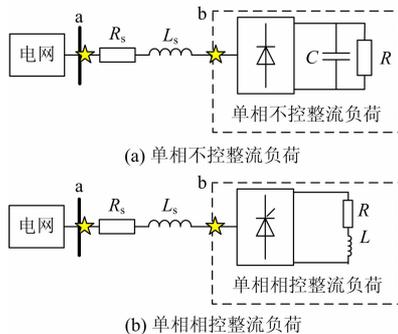


图1 单相整流负荷等效分析电路

Fig. 1 Equivalent analysis circuit of single-phase rectification loads

为分析单相不控和相控整流负荷的谐波功率及其流向特点, 建立图1所示的仿真模型, 设电网电压  $V_s=220\angle 0^\circ$  V, 系统阻抗  $Z_s=11+j5$   $\Omega$ 。图1(a)的直流侧负载  $R=1490.7$   $\Omega$ ,  $C=50$   $\mu\text{F}$ ; 图1(b)晶闸管触发角为  $60^\circ$ , 直流侧负载  $R=200$   $\Omega$ ,  $L=2$  H。在此条件下, 流过单相不控和相控整流系统的电流谐波, 以及网侧(a点)和负荷交流侧(b点)的电压谐波分别

如表1、表2所示。整流负荷的非线性使流过系统的电流  $i_a(t)$ 或  $i_b(t)$ 出现谐波分量, 经系统阻抗作用后导致交流侧电压  $v_b(t)$ 发生畸变。

表1 单相不控整流负荷电压和电流频域分量

Table 1 Frequency domain components of voltage and current of single-phase uncontrolled rectification loads

频域分量	谐波电流 $i_a = i_b$		谐波电压			
			$V_a$		$V_b$	
	幅值/ A	相位/ rad	幅值/ V	相位/ rad	幅值/ V	相位/ rad
基波	0.390	-0.071	311.204	0	306.784	-0.006
3 <sup>th</sup>	0.341	-0.220	0	0	6.379	-2.428
5 <sup>th</sup>	0.257	-0.381	0	0	7.041	-2.366
7 <sup>th</sup>	0.161	-0.578	0	0	5.924	-2.693
9 <sup>th</sup>	0.076	-0.880	0	0	3.550	-2.769

表2 单相相控整流负荷电压和电流频域分量

Table 2 Frequency domain components of voltage and current of single-phase thyristor-controlled rectification loads

频域分量	谐波电流 $i_a = i_b$		谐波电压			
			$V_a$		$V_b$	
	幅值/ A	相位/ rad	幅值/ V	相位/ rad	幅值/ V	相位/ rad
基波	1.078	-0.601	311.204	0	298.378	0.005
3 <sup>th</sup>	0.264	1.610	0	0	4.879	-0.593
5 <sup>th</sup>	0.159	-2.669	0	0	4.337	1.628
7 <sup>th</sup>	0.113	-0.639	0	0	4.165	-2.516
9 <sup>th</sup>	0.088	1.393	0	0	4.075	-0.414

根据功率的定义, 仅次数相同的谐波电压和谐波电流才能产生有功和无功功率<sup>[16]</sup>, 得到表3、表4的a、b点各次谐波有功和无功, 其中a、b点基波功率均为正值, 以基波功率方向为基准, 整流负荷谐波功率均为负值。表3中流过b点的基波有功、谐波有功分别为118.372 W、-2.025 W, 由于电网电压仅含基波分量不吸收谐波功率, 该部分反向流出的谐波有功由电阻 $R_s$ 消耗。可见单相整流负荷为典型的谐波源, 是产生各次谐波功率的来源, 而各次谐波的有功功率由基波功率转化而来<sup>[15]</sup>。当电网电压不含谐波时, 电网输出的全部有功均来自基波功率,

表3 单相不控整流负荷的功率

Table 3 Power of single-phase uncontrolled rectification loads

频域分量	有功功率/W		无功功率/var	
	a点	b点	a点	b点
基波	121.048	118.372	8.490	7.729
3 <sup>th</sup>	0	-1.296	0	-1.748
5 <sup>th</sup>	0	-0.729	0	-1.658
7 <sup>th</sup>	0	-0.288	0	-0.910
9 <sup>th</sup>	0	-0.065	0	-0.263
共计	121.048	116.347	8.490	4.323

表 4 单相相控整流负荷的功率  
Table 4 Power of single-phase thyristor-controlled  
rectification loads

频域 分量	有功功率/W		无功功率/var	
	a点	b点	a点	b点
基波	277.097	264.308	189.204	183.392
3 <sup>th</sup>	0	-0.762	0	-1.040
5 <sup>th</sup>	0	-0.278	0	-0.630
7 <sup>th</sup>	0	-0.142	0	-0.450
9 <sup>th</sup>	0	-0.084	0	-0.349
共计	277.097	263.042	189.204	181.722

基波有功流向非线性负荷后, 其部分有功将转化成谐波有功注入电网。此外, 表 3、表 4 表明系统阻抗的损耗由基波功率和谐波功率共同提供, 二者功率损耗均来自基波能量, 但其方向相反。

## 2 计及谐波耦合的单相整流功率需求建模

正常运行时, 每个周期内单相不控和相控整流负荷均存在两次导通过程。不同的是, 单相不控整流负荷(图 1(a))交流侧仅在每个周期电容充电阶段二极管导通时流过电流, 考虑到电容充电时间只占交流半周期中的很小部分, 交流电流呈间断的脉冲状波形, 含有丰富的谐波<sup>[4]</sup>。单相相控整流负荷(图 1(b))受触发脉冲和直流电感的影响, 其交流电流非正弦变化, 产生谐波电流分量。畸变的交流电流经系统阻抗后, 使单相整流负荷交流侧电压产生若干奇次谐波分量, 设单相整流负荷的端电压为

$$v(t) = \sum_{h=1}^H V_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (1)$$

式中:  $h=1, 3, 5, \dots$  为奇次谐波次数;  $V_h$  和  $\varphi_h$  为  $h$  次谐波电压有效值和相位;  $H$  为研究的最高电压谐波次数。根据单相整流负荷的工作原理, 结合负荷交流侧电压、电流谐波分量之间的耦合关系, 已有研究建立了负荷的谐波耦合导纳矩阵模型<sup>[12-13]</sup>

$$\mathbf{I}_k = \mathbf{Y}^+ \mathbf{V}_h + \mathbf{Y}^- \mathbf{V}_h^* \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{I}_k$  为交流侧谐波电流向量;  $\mathbf{V}_h$  和  $\mathbf{V}_h^*$  为谐波电压及共轭向量;  $\mathbf{Y}^+$  和  $\mathbf{Y}^-$  为谐波耦合导纳矩阵, 单相不控和可控整流的矩阵元素见文献<sup>[12-13]</sup>。

### 2.1 单相不控整流负荷功率需求模型

根据电力系统复功率的定义

$$\tilde{S}_k = \tilde{V}_k \times \tilde{I}_k^* = P_k + jQ_k \quad (3)$$

联立式(1)~式(3)得单相不控整流各次谐波功率

$$P_k = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq k}} A_{k,h} \times \cos\left(\frac{(h-k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h - \varphi_k\right) + B_{k,k} \times \cos(\arctan(k\omega RC)) +$$

$$\sum_{h=1} D_{k,h} \times \cos\left(\frac{(h+k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h + \varphi_k\right) \quad (4)$$

$$Q_k = -\sum_{\substack{h=1 \\ h \neq k}} A_{k,h} \times \sin\left(\frac{(h-k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h - \varphi_k\right) + B_{k,k} \times \sin(\arctan(k\omega RC)) + \sum_{h=1} D_{k,h} \times \sin\left(\frac{(h+k)(\delta + \alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h + \varphi_k\right) \quad (5)$$

$$\text{其中, } A_{k,h} = \frac{2V_k V_h \sqrt{1 + (h\omega RC)^2} \cdot \sin\left(\frac{(h-k)(\delta - \alpha)}{2}\right)}{\pi R (h-k)}$$

$$B_{k,h} = \frac{V_k^2 (\delta - \alpha) \sqrt{1 + (k\omega RC)^2}}{\pi R} \quad (6)$$

$$D_{k,h} = \frac{2V_k V_h \sqrt{1 + (h\omega RC)^2} \cdot \sin\left(\frac{(h+k)(\delta - \alpha)}{2}\right)}{\pi R (h+k)}$$

式中:  $k=1, 3, 5, \dots$  为功率谐波次数;  $R$ 、 $C$  为直流侧负载;  $\alpha$ 、 $\delta$  为二极管的导通、截止角, 可根据文献<sup>[12]</sup>的方法求解。

### 2.2 单相相控整流负荷功率需求模型

同理, 单相相控整流负荷的各次谐波功率为

$$P_k = (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{8V_1 V_k \cos \mu}{\pi^2 kR} \times \cos(k(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k) + \frac{4V_1 V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+1}{2}} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\cos(E_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n-1)(k-n)} + \frac{\cos(F_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n-1)(k+n)} \right] - \frac{4V_1 V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+1}{2}} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\cos(E_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n+1)(k+n)} + \frac{\cos(F_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n+1)(k-n)} \right] + \sum_{h=3} \left\{ (-1)^{\frac{h+k-2}{2}} \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \frac{1}{Rhk} \cdot [\cos(X_{k,h} + \varphi_h) + \cos(Y_{k,h} - \varphi_h)] + \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k-h}{2}} (-1)^{\frac{k-h}{2}} \left[ \frac{\cos(X_{k,h} - \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n-h)} - \frac{\cos(Y_{k,h} + \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n-h)} \right] - \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+h}{2}} (-1)^{\frac{k+h}{2}} \left[ \frac{\cos(X_{k,h} + \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n+h)} - \frac{\cos(Y_{k,h} - \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n+h)} \right] \right\} \quad (7)$$

$$Q_k = (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{8V_1 V_k \cos \mu}{\pi^2 kR} \times \sin(k(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k) - \frac{4V_1 V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+1}{2}} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\sin(E_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n-1)(k-n)} + \frac{\sin(F_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n-1)(k+n)} \right] + \frac{4V_1 V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+1}{2}} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\sin(E_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n+1)(k+n)} + \frac{\sin(F_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n+1)(k-n)} \right] - \sum_{h=3} \left\{ (-1)^{\frac{h+k-2}{2}} \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \frac{1}{Rhk} \cdot [\sin(X_{k,h} + \varphi_h) - \sin(Y_{k,h} - \varphi_h)] + \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k-h}{2}} (-1)^{\frac{k-h}{2}} \left[ \frac{\sin(X_{k,h} - \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n-h)} - \frac{\sin(Y_{k,h} + \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n-h)} \right] - \frac{4V_h V_k}{\pi^2} \sum_{n=2}^{\frac{k+h}{2}} (-1)^{\frac{k+h}{2}} \left[ \frac{\sin(X_{k,h} + \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n+h)} - \frac{\sin(Y_{k,h} - \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n+h)} \right] \right\} \quad (8)$$

其中,

$$\begin{aligned} E_{k,1} &= k\varphi_1 - (k-1)\mu - \varphi_k; & F_{k,1} &= k\varphi_1 - (k+1)\mu - \varphi_k; \\ X_{k,h} &= (k-h)(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k; & Y_{k,h} &= (k+h)(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\varphi_1$  为基波电压相位;  $\mu$  为晶闸管触发角;  $Z_n = \sqrt{R^2 + (n\omega L)^2}$ 、 $\beta_n = \arctan(n\omega L/R)$  分别为直流侧等效电阻和相位。式(4)、式(5)和式(7)、式(8)即为单相不控和相控整流负荷的功率需求模型。该模型计及了整流负荷谐波电压和电流之间的耦合关系, 实现任意给定条件下单相整流负荷谐波功率的精确计算及其流向确定, 具有良好的适用性。该模型的建立为含谐波源负荷的电网潮流计算、非线性负荷谐波损耗电能计算及计费方法提供了理论基础和决策依据。

### 3 仿真验证

#### 3.1 功率需求模型验证

采用提出的模型计算不同条件下单相不控和相控整流负荷的谐波有功和无功功率, 比较本文算法和 Matlab/Simulink 仿真的结果, 验证单相整流负荷功率模型的有效性。利用图 1 的直流负载条件, 负荷端电压谐波条件见表 5, 基波分量的幅值为 220 V, 相位为 0, 各次谐波相位均以基波相位为参考。

表 5 单相整流负荷端电压谐波分量

谐波次数		3	5	7	9	11
案例 1	幅值/%	2.12	2.31	1.95	1.04	0.43
	相位/rad	-2.43	-2.37	-2.46	-2.69	2.77
案例 2	幅值/%	3.52	2.44	2.19	1.24	0.47
	相位/rad	6.57	-8.51	-8.36	2.35	-14.49

图 2 显示了不同谐波条件下, 单相不控和相控整流负荷各次谐波功率的仿真和计算结果, 其中 3、5、7 次谐波有功和无功的含量相对较大。与表 3 和表 4 不同的是, 交流侧谐波电压分量的作用使负荷谐波功率出现正值, 即谐波功率从交流侧流向整流器。对比图 2, 采用功率需求模型计算的单相整流负荷各次谐波有功和无功功率与仿真结果相吻合。为进一步分析该模型的精确度, 表 6 给出了相应谐波条件下的单相不控和相控整流负荷, 各次谐波有功和无功功率相对误差, 以仿真值为真值。表中数据反映出采用该模型计算的谐波功率误差很小, 保持在可接受范围内<sup>[12]</sup>, 由此说明本文功率需求模型推导的正确性。

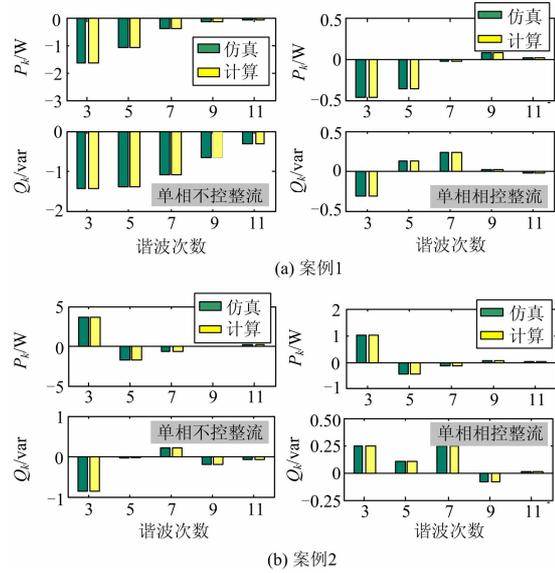


图 2 不同谐波条件下单相整流负荷谐波功率比较

Fig. 2 Harmonic power of single-phase rectification loads under different harmonic conditions

表 6 单相整流负荷谐波功率误差分析

Table 6 Error analysis of harmonic power of single-phase rectification loads

谐波次数		3	5	7	9	11
不控	案例 1 有功/%	0.015	0.23	1.83	5.79	/
	误差 无功/%	0.17	0.39	0.51	0.18	0.23
	案例 2 有功/%	0.03	0.007	0.03	2.33	0.10
	误差 无功/%	0.21	5.88	0.47	0.11	0.27
相控	案例 1 有功/%	1.15	1.21	5.67	2.19	3.45
	误差 无功/%	0.11	4.74	2.33	5.55	6.23
	案例 2 有功/%	1.97	1.61	6.34	2.77	2.83
	误差 无功/%	0.60	3.91	5.13	3.69	/

#### 3.2 功率需求特性分析

根据单相整流负荷功率需求模型, 可分析端电压不同谐波成分对各次谐波功率的贡献大小。定义谐波有功和无功功率导纳矩阵, 将单相不控整流负荷的谐波功率模型式(4)和式(5)改写为

$$P_k = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq k}} f_{k,h}(\alpha, \delta, R, C) \times V_k V_h + f_{k,k}(\alpha, \delta, R, C) \times V_k^2 \quad (10)$$

$$Q_k = \sum_{\substack{h=1 \\ h \neq k}} g_{k,h}(\alpha, \delta, R, C) \times V_k V_h + g_{k,k}(\alpha, \delta, R, C) \times V_k^2 \quad (11)$$

式中,  $f_{k,h}$ 、 $f_{k,k}$  和  $g_{k,h}$ 、 $g_{k,k}$  分别为谐波有功和无功功率导纳矩阵的自导纳、互导纳元素, 二者共同表征谐波电压对谐波功率的作用。对角线元素  $f_{k,k}$ 、 $g_{k,k}$  表征了第  $k$  次谐波电压的平方与第  $k$  次谐波有功和无功功率的关系。

无功功率的自耦合关系,而非对角线元素  $f_{k,h}$ 、 $g_{h,k}$  则表征了第  $k$  次谐波电压和第  $h$  次谐波电压的乘积与第  $k$  次谐波有功和无功功率的互耦合关系。单相不控整流负荷的有功导纳矩阵元素具体表达式为

$$f_{k,h} = \frac{A_{k,h}}{V_k V_h} \times \cos\left(\frac{(h-k)(\delta+\alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h - \varphi_k\right) + \frac{D_{k,h}}{V_k V_h} \times \cos\left(\frac{(h+k)(\delta+\alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h + \varphi_k\right)$$

$$f_{k,k} = \frac{\sqrt{1+(k\omega RC)^2}}{\pi R} \cdot (\delta - \alpha) \times \cos(\arctan(k\omega RC)) + \frac{D_{k,k}}{2V_k^2} \times \cos(k(\delta + \alpha) + \arctan(k\omega RC) + 2\varphi_k)$$
(12)

无功导纳矩阵元素为

$$g_{k,h} = -\frac{A_{k,h}}{V_k V_h} \times \sin\left(\frac{(h-k)(\delta+\alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h - \varphi_k\right) + \frac{D_{k,h}}{V_k V_h} \times \sin\left(\frac{(h+k)(\delta+\alpha)}{2} + \arctan(h\omega RC) + \varphi_h + \varphi_k\right)$$

$$g_{k,k} = -\frac{\sqrt{1+(k\omega RC)^2}}{\pi R} \cdot (\delta - \alpha) \times \sin(\arctan(k\omega RC)) + \frac{D_{k,k}}{2V_k^2} \times \sin(k(\delta + \alpha) + \arctan(k\omega RC) + 2\varphi_k)$$
(13)

采用 3.1 节的负载参数,单相不控整流负荷谐波有功和无功功率导纳矩阵,即式(12)、式(13)元素分布如图 3 所示,为便于分析,图中各矩阵元素均取

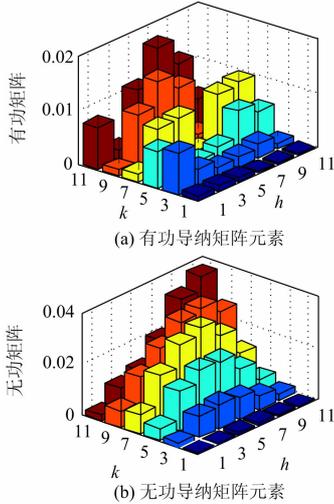


图 3 单相不控整流负荷谐波功率矩阵元素

Fig. 3 Weighting of harmonic power of single-phase uncontrolled rectification loads

绝对值。图 3(b)中矩阵元素相对于图 3(a)较大,导致表 3 中负荷交流侧的谐波无功功率大于有功值。此外,图中各矩阵对角线上的元素随谐波次数的增加而增加,但谐波电压随着谐波次数的增加而显著减小,且功率与谐波电压分量成平方关系,谐波功率依然呈现出随谐波次数增加而减小的趋势。

同理,单相相控整流负荷的功率模型可表示为

$$P_k = f_{k,1}(\mu, R, L) \times V_k V_1 + \sum_{h=3} f_{k,h}(\mu, R, L) \times V_k V_h \quad (14)$$

$$Q_k = g_{k,1}(\mu, R, L) \times V_k V_1 + \sum_{h=3} g_{k,h}(\mu, R, L) \times V_k V_h \quad (15)$$

式中,

$$f_{k,1} = (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{8 \cos \mu}{kR\pi^2} \times \cos(k(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k) + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+1} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\cos(E_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n-1)(k-n)} + \frac{\cos(F_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n-1)(k+n)} \right] - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+1} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\cos(E_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n+1)(k+n)} + \frac{\cos(F_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n+1)(k-n)} \right]$$

$$f_{k,h} = (-1)^{\frac{h+k-2}{2}} \cdot \frac{4}{Rhk\pi^2} \cdot [\cos(X_{k,h} + \varphi_h) + \cos(Y_{k,h} - \varphi_h)] + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k-h} (-1)^{\frac{k-h}{2}} \left[ \frac{\cos(X_{k,h} - \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n-h)} - \frac{\cos(Y_{k,h} + \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n-h)} \right] + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k-h} (-1)^{\frac{k-h}{2}} \left[ \frac{\cos(X_{k,h} - \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n-h)} - \frac{\cos(Y_{k,h} + \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n-h)} \right] - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+h} (-1)^{\frac{k+h}{2}} \left[ \frac{\cos(X_{k,h} + \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n+h)} - \frac{\cos(Y_{k,h} - \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n+h)} \right]$$
(16)

$$g_{k,1} = -(-1)^{\frac{k-1}{2}} \cdot \frac{8 \cos \mu}{kR\pi^2} \times \sin(k(\varphi_1 - \mu) - \varphi_k) - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+1} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\sin(E_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n-1)(k-n)} + \frac{\sin(F_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n-1)(k+n)} \right] - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+1} (-1)^{\frac{k+1}{2}} \cdot \left[ \frac{\sin(E_{k,1} + \beta_n)}{Z_n(n+1)(k+n)} + \frac{\sin(F_{k,1} - \beta_n)}{Z_n(n+1)(k-n)} \right]$$

$$g_{k,h} = (-1)^{\frac{h+k-2}{2}} \cdot \frac{4}{Rhk\pi^2} \cdot [\sin(X_{k,h} + \varphi_h) + \sin(Y_{k,h} - \varphi_h)] + \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k-h} (-1)^{\frac{k-h}{2}} \left[ \frac{\sin(X_{k,h} - \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n-h)} - \frac{\sin(Y_{k,h} + \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n-h)} \right] - \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=2}^{k+h} (-1)^{\frac{k+h}{2}} \left[ \frac{\sin(X_{k,h} + \beta_n + \varphi_h)}{Z_n(n+k)(n+h)} - \frac{\sin(Y_{k,h} - \beta_n - \varphi_h)}{Z_n(n-k)(n+h)} \right]$$
(17)

根据图 3 的参数条件,图 4 显示了单相相控整

流负荷谐波有功和无功功率的导纳矩阵,即式(16)、式(17)的元素分布。为便于分析图中各矩阵元素,以有功、无功导纳元素最大值 $f_{1,1}$ 和 $g_{1,1}$ 为基准,将导纳矩阵元素标幺化。相对于单相不控整流负荷(图3),图4中各矩阵元素大小随谐波次数的增加而减小,无功矩阵元素相对于有功较小。两个矩阵的主对角线元素幅值均很大;而无功矩阵第1列元素为零,以第1行元素为主。有功和无功导纳矩阵的上述特性使单相不控和相控整流负荷功率模型进一步简化,为满足工程实际应用需求提供理论依据。

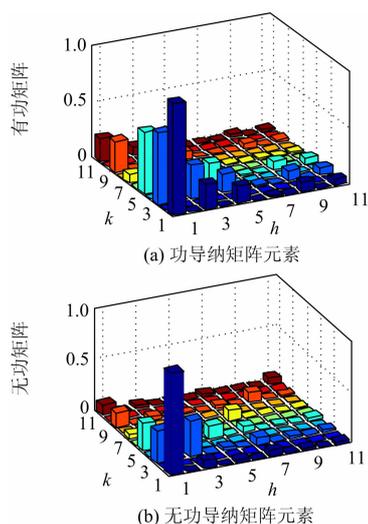


图4 单相相控整流负荷谐波功率导纳元素

Fig. 4 Weighting of harmonic power of single-phase thyristor-controlled rectification loads

## 4 结论

本文建立了计及谐波耦合的单相不控和相控整流负荷功率需求模型,研究了整流负荷端电压不同谐波成分对其谐波功率的贡献大小。通过仿真分析,验证该功率需求模型能有效计算不同谐波条件下的各次谐波有功和无功功率,具有较高精度。本文提出的功率模型为分析非线性整流负荷谐波功率特性及其对电网电能质量与效率的影响提供基础,此外,还可用于含谐波源系统的非迭代式潮流计算与分析。

## 参考文献

[1] 赵鲁,李耀华,葛琼璇,等. 特定谐波消除及优化脉宽调制单相整流器的研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 57-64.  
ZHAO Lu, LI Yaohua, GE Qiongjuan, et al. Study of selective harmonic elimination and optimization pulse width modulation single-phase rectifier[J]. Transactions

of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 57-64.  
[2] 葛文捷, 黄梅, 张维戈. 电动汽车充电站经济运行分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 15-21.  
GE Wenjie, HUANG Mei, ZHANG Weige. Economic operation analysis of the electric vehicle charging station [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 15-21.  
[3] 马玲玲, 杨军, 付聪, 等. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 140-148.  
MA Lingling, YANG Jun, FU Cong, et al. Review on impact of electric car charging and discharging on power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 140-148.  
[4] 雍静, 陈亮, 陈双燕, 等. 台式计算机负荷的频域谐波模型及衰减特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 122-129.  
YONG Jing, CHEN Liang, CHEN Shuangyan, et al. Frequency-domain harmonic model and attenuation characteristics of desktop PC loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 122-129.  
[5] 周念成, 蒲松林, 王强钢, 等. 电动汽车快速充电站的储能缓冲系统控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 127-134.  
ZHOU Niancheng, PU Songlin, WANG Qianggang, et al. Control strategy of energy storage buffer system for fast charging electric vehicle station[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 127-134.  
[6] 乔小敏, 王增平, 文俊, 等. 高压直流输电中谐波对换流变压器差动保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 111-114.  
QIAO Xiaomin, WANG Zengping, WEN Jun, et al. Influence of converter transformer differential protection by harmonic in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 111-114.  
[7] 邓志, 徐柏榆, 梅桂华, 等. 谐波功率对感应式有功电度表计量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 138-143.  
DENG Zhi, XU Baiyu, MEI Guihua, et al. Influence of harmonic powers on metering error of induction watt-hour meter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 138-143.  
[8] 黄玉春. 电力谐波对电能计量影响的分析与探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 123-135.  
HUANG Yuchun. Analysis and discussion of power harmonics influencing the electric energy computation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 123-135.  
[9] 孙媛媛, 王小宇, 尹志明, 等. 多谐波源系统的非迭代

- 式谐波潮流分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 83-90.
- SUN Yuanyuan, WANG Xiaoyu, YIN Zhiming, et al. Non-iterative harmonic power flow analysis for power systems with multiple harmonic sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 83-90.
- [10] 胡海涛, 何正友, 王江峰, 等. 考虑谐波功率修正的地铁交直流潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 112-119.
- HU Haitao, HE Zhengyou, WANG Jiangfeng, et al. AC/DC power flow calculation method for metro system considering harmonic power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 112-119.
- [11] YILMAZ M, KREIN P T. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2151-2169.
- [12] YONG J, CHEN L, NASSIF A B, et al. A frequency domain harmonic model for compact fluorescent lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1182-1189.
- [13] SUN Y, ZHANG G, XU W, et al. A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1574-1582.
- [14] 周莉, 刘开培. 电能计量误差分析与电能计费问题的讨论[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 63-68.
- ZHOU Li, LIU Kaipei. Error analyzing for electric metering and discussion about pricing of electric energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 63-68.
- [15] 宁志豪, 罗隆福, 张勇, 等. 大功率整流系统谐波功率特性及其对电能计量的影响和节能分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 248-255.
- NING Zhihao, LUO Longfu, ZHANG Yong, et al. Analysis of energy saving and harmonic power characteristics and its effects on electric energy measurement in high power rectifier system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 248-255.
- [16] 赵贺, 林海雪. 电网中非线性负荷谐波功率方向的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 47-50.
- ZHAO He, LIN Haixue. Determining harmonic power flow direction of nonlinear load in power network[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 47-50.
- [17] 陈双燕. 低压单相非线性负荷谐波特性的实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- CHEN Shuangyan. The research on harmonics characteristics of single-phase nonlinear loads in low voltage distribution system based on experiments[J]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

收稿日期: 2014-12-25; 修回日期: 2015-04-11

作者简介:

张航(1988-), 女, 助理工程师, 从事电力系统自动化工作; E-mail: 852355691@qq.com

毛欣(1977-), 女, 高级工程师, 从事电力系统运行和变电站自动化工作。

(编辑 葛艳娜)