

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.08.024

非线性负载 Norton 等效模型的改进分析方法

南 琳 尉 伍

(电子科技大学 电子科学技术研究院 成都 611731)

摘要:建立高精度、计算简单的等效模型,对电力系统中非线性负载谐波情况进行准确分析,一直是国内外研究人员的关注重点。而 Norton 等效电路模型具有表达式及参数简单易计算的优点,使其在非线性负载等效模型分析中广泛应用。但现有 Norton 等效模型没有考虑非线性负载谐波电流与谐波电压间的相互影响,分析结果存在较大误差。因此,为了提高 Norton 等效模型的精度,需要对其进行适当的改进。在传统 Norton 等效模型的基础上,对非线性负载存在影响的谐波进行分类,将得到的附加电流谐波分别用受控源表示,提出含有受控源的 Norton 改进等效模型。最后通过采用两种模型对电力系统非线性负载实测电压和电流计算对比,发现在不同的电压条件下,传统 Norton 模型等效阻抗计算结果差异达到2个数量级,而含有受控源的改进 Norton 等效电路模型计算得到的等效阻抗大小变化不大,基本可以近似相等。可见,相较于传统不含受控源的 Norton 等效模型,提出的含有受控源的 Norton 等效模型的精度与稳定性显著提升。

关键词:非线性负载;谐波电流;Norton 等效模型;等效受控源

中图分类号: TM711 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Analysis on the improved method of nonlinear load Norton equivalent model

Nan Lin Wei Wu

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: It has attracted attention of the researchers worldwide to establish an equivalent model with high accuracy and simple calculation, which will be used to analysis harmonic of nonlinear load in power system. Norton model is widely used in nonlinear load analysis because it is simple to calculate. However, the interaction between harmonic current and voltage is not considered by the traditional Norton model, which has a large error in the analysis results. Therefore, it is necessary to change its structure in order to improve the accuracy of Norton model. In this paper, the harmonics which has the effects on nonlinear loads are classified, the additional current harmonics are represented by different controlled sources. Then, a modified Norton model is proposed based on the traditional Norton model. Finally, by using the two models under different voltages, the results show that there are 2 orders of magnitude difference in the equivalent impedance value of the traditional Norton model, but the results of modified Norton model have little change and can be approximately equal. Obviously, the modified Norton model proposed in this paper has higher accuracy and stability compared with the traditional Norton model.

Keywords: nonlinear load; harmonic current; Norton model; equivalent controlled source

0 引 言

按照工作原理上的不同,可以将电力系统中的非线性

性负载大体分为换流器负载和具有非线性伏安特性的负载两种类型。换流器负载主要是指包含有半导体开关器件的电力电子设备,通过半导体开关器件按照一定的规律开闭不同电路,产生谐波电流。这类谐波电流可以根

据半导体开关器件的开关方式和电路结构而计算得到^[1-3]。具有非线性伏安特性的负载主要是含有电弧和铁磁材料的电力电子设备,这类非线性负载的谐波电流可以通过供电电压和负载的伏安特性求得^[4,5]。虽然上述电力系统非线性负载的谐波特性理论上都可以通过计算得到,但是对于绝大多数的电力电子设备我们不知道其内部的具体电路结构和元器件的参数,因此这种通过直接理论计算的方式不能对非线性负载进行有效的分析。

为了对电力系统中的非线性负载谐波情况进行有效地分析和评估,一种有效的办法是使用等效模型来表征非线性负载。国内外许多研究人员对非线性负载的等效模型进行了相关的研究,并提出了许多具有实践意义的电力系统非线性负载等效模型。如恒流源模型^[6], Norton 模型^[7-8], 谐波耦合导纳矩阵模型^[9], 基于最小二乘逼近的谐波源模型^[10], 以及基于传递矩阵的谐波源模型^[11]等。谐波耦合导纳矩阵模型较多地考虑了非线性负载产生谐波的机理,通过数学表达式计算可以得到模型的导纳参数,但是计算过程非常繁琐。另外,谐波耦合导纳矩阵模型需要对负载施加某几次谐波电压,而保持某次谐波电压不变,这样工程实现也非常困难。同样,基于最小二乘逼近的谐波源模型和基于传递矩阵的谐波源模型也存在着模型参数获取困难,难以通过工程方式实现等一系列问题。恒流源模型和 Norton 模型都是一种较为简单的非线性负载模型,模型参数便于计算。Norton 模型比恒流源模型多了一个并联的阻抗参数,这弥补了恒流源模型不能反映非线性负载电压和电流耦合关系的缺陷。因此,在许多场合都选用 Norton 模型来对非线性负载进行模型分析。但是 Norton 等效模型没有考虑非线性负载的谐波电流与谐波电压间的相互影响,存在较大误差^[12]。文献[13]中,作者通过实验提出单相非线性负载的 Norton 模型与电压的波峰系数存在很大关系,Norton 模型适合于电压波形较为平坦波形,误差在可以接受范围内,对于尖顶波则不适用。因此,为了提高 Norton 等效模型的精度与适用范围,需要根据 Norton 等效模型的缺陷,对其进行适当的改进。

本文重点分析了电力系统中非线性负载的 Norton 等效模型,针对 Norton 等效模型存在的缺陷,提出含有受控源的 Norton 改进模型新方法。改进的 Norton 模型充分考虑了谐波间的相互影响,与传统 Norton 模型相比具有较高的精确度。本文最后通过一个仿真算例对所提出的改进方法进行验证,仿真结果表明,文章所提的非线性负载 Norton 等效模型改进分析方法与传统方法相比具有较高的精度,优势明显。

1 非线性负载的 Norton 等效模型

如图 1 所示为非线性负载 Norton 等效模型。Norton 模型将非线性负载的某次谐波电流和谐波电压通过电流源与等效阻抗并联的方式来体现^[14]。

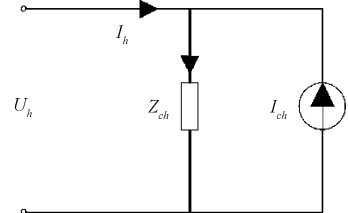


图 1 非线性负载的 Norton 等效模型

Fig. 1 Norton equivalent model of nonlinear load

对于并联的电流源和阻抗均为恒定的电路来说,通过 2 次测量变化的谐波电压与谐波电流,然后运用波动量法可以求得对应的模型参数^[15]。假设 2 次测得的谐波电压和对应的谐波电流分别为 $V_h^{(1)}$ 、 $V_h^{(2)}$ 和 $I_h^{(1)}$ 、 $I_h^{(2)}$, 根据波动量法可得到:

$$Z_{ch} = \frac{V_h^{(2)} - V_h^{(1)}}{I_h^{(2)} - I_h^{(1)}} \quad (1)$$

$$I_{ch} = \frac{V_h^{(1)}}{Z_{ch}} - I_h^{(1)} = \frac{V_h^{(2)}}{Z_{ch}} - I_h^{(2)} \quad (2)$$

式中: Z_{ch} 为非线性负载的等效阻抗, I_{ch} 为非线性负载中等效电流源的电流。式(1)和(2)中的参数都是复数形式,因此在计算时,不仅要知道谐波电压和电流的幅值,还需要有谐波电压和电流的相角大小参数(实际的检测常将基波电压相位设置为 0,其他次数谐波的相位根据基波的相位进行转化)。

由式(1)和(2)可以看到,Norton 等效模型的各次谐波等效阻抗和各次谐波电流源电流可以通过任意两次对输入端检测得到的不同电压和电流数据而计算得到。Norton 模型输入端口不同电压状态下的等效阻抗和等效电流源电流当作一个常数来看待,没有考虑不同输入电压和不同端口电流对模型等效阻抗和等效电流源电流的影响。但是在实际的非线性负载中,不同输入电压状态下,负载特性发生变化这一现象是普遍存在的。因此,对于绝大多数的非线性负载,使用 Norton 模型进行等效分析存在一些问题。文献[10-11]即对 Norton 等效模型在单相低压系统中的应用进行了实验研究,证明了 Norton 等效模型仅在输入电压波形呈平坦波时可以适用,但仍存在一些误差。

2 含有受控源的 Norton 改进新模型

电力系统非线性负载的输入端谐波电压与负载的谐波电流存在较强的相互影响,某一次的谐波电流还会对其他次的谐波电流产生影响^[16-17]。因此,可以将相互影响的谐波进行简单的分类:1)负载受到输入端谐波电压影响的附加谐波;2)负载受到自身谐波电流影响的附加谐波。

将上述两类相互影响得到的附加电流谐波分别用受控源表示,可以得到如图2所示的含有受控源的等效模型。其中 I_{Uh} 为输入端谐波电压影响的附加电流谐波, I_{Ih} 为自身电流谐波影响的附加电流谐波。将这两种附加电流谐波相叠加,可以得到如图3所示的等效模型。图3中的 I_{zh} 是图2中的 I_{Uh} 和 I_{Ih} 的叠加。

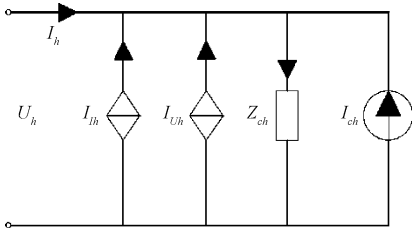


图2 含有受控源的 Norton 等效模型

Fig.2 Norton equivalent model with controlled source

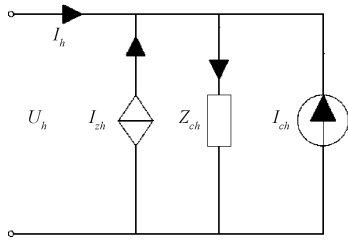


图3 图2 等效简化模型

Fig.3 Simplified equivalent model of Fig.2

假设2次测量过程得到的输入电压和电流分别为 $V_h^{(1)}$ 、 $V_h^{(2)}$ 和 $I_h^{(1)}$ 、 $I_h^{(2)}$;受控源电流为 $I_{zh}^{(1)}$ 和 $I_{zh}^{(2)}$;阻抗 Z_{ch} 上的电流为 $I_{Zch}^{(1)}$ 和 $I_{Zch}^{(2)}$ 。则:

$$I_h^{(1)} = I_{Zch}^{(1)} - I_{ch} - I_{zh}^{(1)} \quad (3)$$

$$I_h^{(2)} = I_{Zch}^{(2)} - I_{ch} - I_{zh}^{(2)} \quad (4)$$

又因为:

$$I_{Zch}^{(1)} = \frac{V_h^{(1)}}{Z_{ch}} \quad (5)$$

$$I_{Zch}^{(2)} = \frac{V_h^{(2)}}{Z_{ch}} \quad (6)$$

将式(5)、(6)分别代入式(3)、(4),得到:

$$I_h^{(1)} = \frac{V_h^{(1)}}{Z_{ch}} - I_{ch} - I_{zh}^{(1)} \quad (7)$$

$$I_h^{(2)} = \frac{V_h^{(2)}}{Z_{ch}} - I_{ch} - I_{zh}^{(2)} \quad (8)$$

计算式(7)和(8)得到:

$$I_h^{(1)} - I_h^{(2)} = I_{zh}^{(2)} - I_{zh}^{(1)} + \frac{V_h^{(1)} - V_h^{(2)}}{Z_{ch}} \quad (9)$$

经过进一步的整理,得到 Norton 等效阻抗:

$$Z_{ch} = \frac{V_h^{(1)} - V_h^{(2)}}{(I_h^{(1)} - I_h^{(2)}) - (I_{zh}^{(2)} - I_{zh}^{(1)})} \quad (10)$$

等效电流源电流大小为:

$$I_{ch} = \frac{V_h^{(1)}}{Z_{ch}} - I_h^{(1)} - I_{zh}^{(1)} = \frac{V_h^{(2)}}{Z_{ch}} - I_h^{(2)} - I_{zh}^{(2)} \quad (11)$$

对于受控源电流 I_{zh} ,基本上是由 V_h 决定。假设 I_{zh} 与 V_h 存在某种特殊的函数运算关系,令:

$$I_{zh} = f(V_h) \quad (12)$$

将式(12)代入式(10),得到:

$$Z_{ch} = \frac{V_h^{(1)} - V_h^{(2)}}{(I_h^{(1)} - I_h^{(2)}) - (f_1(V_h^{(2)}) - f_1(V_h^{(1)}))} \quad (13)$$

这样,如果知道非线性负载的输入端的电压和电流以及 I_{zh} 与 V_h 存在的函数关系,根据式(13)和(11)就可以计算得到改进 Norton 模型的等效阻抗和等效电流源的参数。

假设对非线性负载第3次测量得到的输入电压和电流分别为 $V_h^{(3)}$ 和 $I_h^{(3)}$,则前3次测量结果有:

$$\frac{V_h^{(1)} - V_h^{(2)}}{(I_h^{(1)} - I_h^{(2)}) - (f_1(V_h^{(2)}) - f_1(V_h^{(1)}))} = \frac{V_h^{(1)} - V_h^{(3)}}{(I_h^{(1)} - I_h^{(3)}) - (f_1(V_h^{(3)}) - f_1(V_h^{(1)}))} \quad (14)$$

经整理得到:

$$(V_h^{(3)} - V_h^{(2)})f_1(V_h^{(1)}) - (V_h^{(3)} - V_h^{(1)})f_1(V_h^{(2)}) + (V_h^{(2)} - V_h^{(1)})f_1(V_h^{(3)}) = -(V_h^{(3)} - V_h^{(2)})I_h^{(1)} + (V_h^{(3)} - V_h^{(1)})I_h^{(2)} - (V_h^{(2)} - V_h^{(1)})I_h^{(3)} \quad (15)$$

每增加一次测量,就可以与前面的两次测量结果构成形如式(15)的关系式。假设 I_{zh} 和 V_h 的函数关系可以用 V_h 的 n 次多项式表示,即:

$$I_{zh} = f(V_h) = \sum_{k=1}^n a_k V_h^k \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),可以得到关于 a_1, a_2, \dots, a_n 的方程。因此,通过增加测量数据的次数,构建 n 个关于多项式参数 a_1, a_2, \dots, a_n 的线性方程组,求解方程组就可以得到多项式的系数,进而得到 I_{zh} 和 V_h 的函数关系。再将得到的 I_{zh} 和 V_h 的函数关系反代入式(13)和(11),就可以求解得到改进 Norton 模型的等效阻抗和等效电流源的参数。

3 算例仿真分析

为了验证本文提出的含有受控源的 Norton 改进模型新方法,本文分别使用传统 Norton 模型方法和改进 Norton 模型方法对电力系统非线性负载实测电压和电流进行计算,比较两者的模型参数的精度与稳定性,分析含受控源的改进 Norton 等效模型的特点。

仿真算例的数据使用的是文献[8]附录二中对个人电脑输入谐波电压和谐波电流的实测数据,具有较强的非线性。电压和电流谐波数据如表 1 所示。

表 1 电压和电流谐波实测数据

Table 1 Measured harmonics of voltage and current

测试	谐波	电压幅值/V	电压相位/(°)	电流幅值/A	电流相位/(°)
测试 1	1	169.405 4	0	0.419 79	8.016 6
	3	0.082 316	324.939 6	0.393 28	179.19 89
	5	0.106 44	302.408 4	0.342 63	357.837 5
	7	0.037 248	7.356 6	0.275 99	176.365 9
测试 2	1	169.257 9	0	0.424 74	355.722
	3	7.094 1	15.879 3	0.389 58	144.728 1
	5	4.022 4	203.875 3	0.309 02	300.590 8
	7	1.667 3	36.491 4	0.208 52	96.078
测试 3	1	169.115 2	0	0.406 63	8.245 5
	3	8.644 8	179.825 8	0.375 73	180.618 4
	5	0.0865 22	206.056 3	0.346 42	359.978 3
	7	0.081 7	97.671 1	0.287 92	179.818 9
测试 4	1	169.183 5	0	0.436 58	8.527 7
	3	8.493 3	0.130 3	0.392 73	179.357 4
	5	0.068 406	113.148 2	0.313 01	1.066 1
	7	0.471 61	106.282 5	0.235 95	180.893 3
测试 5	1	169.377 5	0	0.408 59	8.833 9
	3	0.019 869	273.914 2	0.386 15	179.693 2
	5	8.475 6	359.761 5	0.359 1	359.942 9
	7	0.071 534	341.765 5	0.319 86	175.529 5

根据传统 Norton 等效模型的定义与参数计算方法,将表 1 中数据代入到式(1)和(2)中,可以计算得到非线性负载的 Norton 等效模型的等效阻抗和等效电流源参数。以 5 次谐波为例,分别计算每两次测试数据的模型参数,计算结果如表 2 所示。

理想状态下,非线性负载的等效电路模型需要能在不同的输入电压条件下都能较为准确地表示非线性负载特性,等效模型的参数不应发生较大变化。从表 2 中的计算结果可以看到,传统 Norton 等效模型中,虽然选择不同两组测试数据计算得到的 Norton 模型等效电流源参数变化不大,但是等效阻抗的计算结果差异较大,最大和最小的等效阻抗最大的差异达到了 2 个数量级。由此可见,传统 Norton 模型在对非线性负载的谐波建模分析中

表 2 非线性负载 5 次谐波 Norton 等效模型参数

Table 2 Parameters of 5th harmonic Norton model

测试波形	阻抗幅值	阻抗相位	电流源 电流幅值	电流相位
测试 1/2	12.883	-31.433	0.335	178.412
测试 1/3	10.762	86.451	0.350	178.836
测试 1/4	4.995	-28.708	0.324	179.534
测试 1/5	402.545	-36.576	0.342	177.852
测试 2/3	12.062	-30.743	0.350	-179.040
测试 2/4	12.845	-35.349	0.318	-179.451
测试 2/5	36.740	-45.307	0.255	140.160
测试 3/4	3.324	-106.649	0.329	-176.693
测试 3/5	674.447	1.042	0.347	179.987
测试 4/5	182.639	6.969	0.313	-179.000

存在较大的误差,在具有较强非线性特性的负载谐波分析中没有实际意义。

为了计算本文提出的含有受控源的非线性负载 Norton 等效模型,将表 1 中数据按照式(15)构建含有参数 a_1, a_2, \dots, a_n 的线性方程组,求解方程组可以得到等效受控源的非线性拟合结果。进而将求解得到的等效受控源的非线性拟合结果相继代入式(13)和(11),可以求出改进 Norton 等效模型的参数。

选择表 1 测量数据中的 5 次谐波,计算得到等效受控电流源的 10 次非线性拟合参数如表 3 所示。使用表 3 中的拟合参数可以等效表示非线性负载的输入端谐波电压与负载的谐波电流之间的相互影响。进一步计算得到含有受控源的改进 Norton 等效模型的等效电阻和等效电流源参数如表 4 所示。

表 3 等效受控源的非线性拟合参数

Table 3 Nonlinear fitting parameters of equivalent controlled source

参数	参数大小	参数	参数大小
a_{10}	$-5.67 \times 10^{-6} + 1.87 \times 10^{-6}i$	a_5	$4.16 \times 10^{-4} - 1.24 \times 10^{-4}i$
a_9	$4.90 \times 10^{-5} - 1.56 \times 10^{-5}i$	a_4	$2.50 \times 10^{-3} - 1.35 \times 10^{-3}i$
a_8	$-7.56 \times 10^{-6} - 3.35 \times 10^{-6}i$	a_3	$3.27 \times 10^{-2} - 7.42 \times 10^{-2}i$
a_7	$-3.85 \times 10^{-6} + 4.70 \times 10^{-6}i$	a_2	$-0.98 + 0.22i$
a_6	$3.88 \times 10^{-5} + 7.80 \times 10^{-5}i$	a_1	$1.98 \times 10^{-15} - 5.32 \times 10^{-15}i$

表 4 非线性负载 5 次谐波改进 Norton 模型参数

Table 4 Parameters of improved 5th harmonic Norton model

测试波形	阻抗幅值	阻抗相位	电流源 电流幅值	电流相位
测试 1/2	4.128	68.342	0.365	-177.317
测试 1/3	4.571	101.088	0.371	-179.280
测试 1/4	4.766	-17.491	0.332	-178.175
测试 1/5	5.218	87.621	0.366	-178.774
测试 2/3	4.051	67.977	2.347	125.777
测试 2/4	4.271	70.896	2.305	124.374
测试 2/5	5.032	79.342	2.177	120.723
测试 3/4	2.612	-118.693	0.314	-177.414
测试 3/5	5.218	87.899	0.349	176.783
测试 4/5	5.185	85.708	0.305	-179.560

从表4中可以看到,使用含有受控源的改进Norton等效电路模型方法计算得到的模型等效阻抗大小在不同的电压条件下变化不大,基本可以近似相等。表4中的模型阻抗与表2中的模型等效阻抗大小相比整体偏小,稳定性有了极大的提高,因此模型的精度也有了极大的提高。表4中的等效电流源参数与表2中的基本接近,其中表4中有3个电流源计算结果存在较大变化,这在一定程度上影响了改进Norton等效模型方法的精度,但是影响不大。综合比较表4和表2中的计算结果,可见,相较于传统不含受控源的Norton等效模型,含有受控源的Norton等效模型的精度具有显著提升。

4 结 论

本文针对电力系统中非线性负载的谐波Norton等效模型存在没有考虑非线性负载的谐波电流与谐波电压间的相互影响、不能较好地反映非线性负载电压和电流耦合关系的缺陷,提出了一种含有受控源的非线性负载改进Norton等效模型分析方法。本文对提出的改进Norton等效模型进行了详细的理论推导,使用多项式非线性拟合的方式对改进Norton模型中的受控电流源进行非线性拟合。通过理论分析、推导、仿真计算,可以看到,非线性负载的改进Norton等效模型充分考虑了非线性负载电压和电流间的相互影响与耦合关系,与传统的Norton等效模型相比较具有模型参数稳定、精度高、适用范围广等优势。改进Norton等效模型分析方法为电力系统中的非线性负载谐波建模分析提供一种有效的思路与方法。

参考文献

- [1] 高大珩,尉伍,王艺炜. 基于 Prony 算法和改进 Budeanu 理论的电力系统功率测量研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(10):1582-1590.
GAO D H, WEI W, WANG Y W. Research on power measurement based on Prony algorithm and improved Budeanu theory [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(10):1582-1590.
- [2] 雍静,肖兵. 典型单相非线性负荷的精确谐波模型及其谐波衰减特性[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3210-3219.
YONG J, XIAO B. Harmonic modeling and investigation on harmonic attenuation effect for typical single-phase nonlinear loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19):3210-3219.
- [3] 汪通,林晓焕,郭丹蕊,等. 基于小信号分析的电力电子负载动态特性研究[J]. 国外电子测量技术,2015,34(11):65-70.
WANG T, LIN X H, GUO D R, et al. Research on the

- dynamic characteristics of power electronic load based on small[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015,34(11):65-70.
- [4] 赵婵娟,王建平,孙伟,等. 基于相关性分布式卡尔曼滤波的谐波检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(9):1333-1341.
ZHAO CH J, WANG J P, SUN W, et al. Harmonic detection method based on distributed related Kalman filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(9):1333-1341.
- [5] MAZUMDAR J, HARLEY R G, LAMBERT F. System and method for determining harmonic contributions from non-linear loads[C]. Fourtieth Ias Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, IEEE, 2005:2456-2463.
- [6] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
WU J CH. Harmonic analysis of the power system[M]. Beijing:China Electric Power Press,1998.
- [7] CANESIN C A, OLIVEIRA L C O D, SOUZA J B, et al. A time-domain harmonic power-flow analysis in electrical energy distribution networks, using Norton models for non-linear loading [C]. International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE, 2014:778-782.
- [8] 刘晓璇,李建文,李永刚. 基于诺顿等效电路的多谐波源责任划分研究[J]. 电测与仪表,2015,52(17):79-83.
LIU X X, LI J W, LI Y G. Quantifying harmonic responsibilities of multiple harmonic sources based on Norton equivalent model [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(17):79-83.
- [9] 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.
- [10] 郑连清,吴萍,李鹏. 电力系统中谐波源的建模方法[J]. 电网技术,2010,34(8):41-45.
ZHENG L Q, WU P, LI K. Modeling method of power system harmonic source [J]. Power System Technology, 2010,34(8):41-45.
- [11] LIN S, YE J R, ZHAO L. Harmonic modelling for single-phase bridge load by means of cross admittance matrix [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015.
- [12] RYLANDER M, GRADY W M. Problems in the use of Norton equivalent models for single-phase nonlinear loads[C]. Power and Energy Society General Meeting,

- IEEE, 2010;1-7.
- [13] 雍静, 王一平. 低压配电系统中非线性负荷谐波诺顿模型成立条件[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(12):36-42.
- YONG J, WANG Y P. The harmonic Norton model established conditions of nonlinear load in low voltage distribution system[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(12):36-42.
- [14] 雍静, 王一平. 低压配电系统单相非线性负荷谐波诺顿模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2692-2698.
- YONG J, WANG Y P. Research on the harmonic norton model of single-phase nonlinear loads in low voltage distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2692-2698.
- [15] YONG J, NASSIF A B, XU W. Effect of voltage crest shape on the harmonic amplification and attenuation of diode-bridge converter-based loads[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(10):1033-1041.
- [16] RAWA M J H, THOMAS D W P, SUMNER M. Simulation of non-linear loads for harmonic studies[C]. International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, IEEE, 2011:1-6.

- [17] ITOH J I, ASHIDA I. A novel three-phase pfc rectifier using a harmonic current injection method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2):715-722.

作者简介



南琳, 2015年于南昌大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子, 数字功率。

E-mail: nanlin2016@163.com

Nan Lin received B. Sc. from Nanchang University in 2015. Now she is a M. Sc. candidate in university of Electronic Science and Technology of China. Her main research direction is power electronics and digital power technology.



尉伍, 2014年于齐鲁工业大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为电力电子, 汽车电子。

E-mail: weiwuuestc@163.com

Wei Wu, received B. Sc. from Qilu University of Technology in 2014. Now he is a M. Sc. candidate in University of Electronic Science and Technology of China. His main research direction is power electronics and automotive electronics.