

# 以沃尔什函数为基的馈线等效负荷密度模型

武晓朦<sup>1</sup>, 刘健<sup>2</sup>

(1. 西安石油学院自动化系, 陕西 西安 710065; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 提出了以沃尔什函数为基建立等效负荷密度模型, 不需要量测各配电变压器的供出负荷, 根据馈线两端的量测数据, 确定负荷分布, 对配电网进行简化分析计算。文中给出了若干实例, 并与严格算法、负荷均匀分布法的计算结果进行了比较, 结果表明了提出的方法是可行的。

**关键词:** 馈线自动化; 数学模型; 负荷密度; 潮流分析; 沃尔什函数

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)03-0006-05

## 1 引言

近年来针对配电网的规模大、缺乏量测数据等特点, 建立简化模型和进行简化分析的研究十分活跃<sup>[1~7]</sup>。文献[1~4]的方法获得的结果极为粗糙。文献[5]将负荷沿馈线按均匀分布来处理(即均匀分布法), 该方法虽然简化配电网, 但按均匀分布来处理沿馈线的负荷与实际分布相差较大。文献[6][7]根据馈线上各负荷的量测结果生成一个等效负荷, 这种方法仍需依赖各配变的量测值, 因而仍无法解决配电网中缺乏量测的问题。

本文提出以沃尔什函数为基建立等效负荷密度模型, 根据馈线两端的量测数据, 确定负荷分布, 对配电网进行简化分析计算, 不需要量测各配电变压器的供出负荷, 仍能得到有价值的潮流近似计算结果。

## 2 基本原理

图1所示为一段典型的馈线, A和B分别为该馈线两端的分段开关,  $S_A$ 、 $S_{Ap}$ 和 $S_B$ 、 $S_{Bp}$ 分别为流过A和B的功率,  $S(\cdot)$ 为该段馈线在距B端长度为处的负荷。

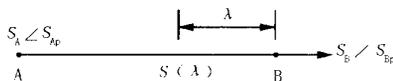


图1 一段典型的馈线  
Fig. 1 A typical feeder

将A、B间供出的不含沿线功率损耗的总负荷表示为 $S$ 、 $S_p$ , 可以建立如图2所示的8种负荷沿线分布形式。这8种形式是以沃尔什函数为基建立

的。

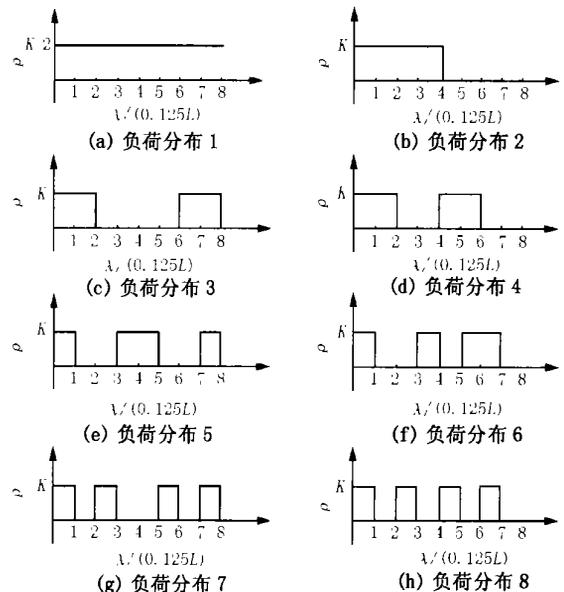


图2 馈线沿线负荷的8种基本分布形式

Fig. 2 Load distribution patterns along the feeder

针对8种负荷分布形式, 可以分别写出负荷分布密度函数 $\rho(x)$ 为:

$$\rho(x) = K/2 \quad (1)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} K & 0 < x < L/4 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} K & L/4 < x < L/2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} K & L/2 < x < 3L/4 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} K & 0 < x < L/4 \\ & L/4 < x < L/2 \\ & L/2 < x < 3L/4 \\ & 3L/4 < x < L \end{cases} \quad (5)$$

$$\rho(x) = \begin{cases} K & 0 < x < L/8 \\ & L/8 < x < L/4 \\ & L/4 < x < 3L/8 \\ & 3L/8 < x < L/2 \\ & L/2 < x < 5L/8 \\ & 5L/8 < x < 3L/4 \\ & 3L/4 < x < L \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} ( ) = \begin{cases} K & 0 & L/8 & 3L/8 & L/2 \\ & 5L/8 & & 7L/8 & \\ 0 & \text{其它} & & & \end{cases} & (6) \\ ( ) = \begin{cases} K & 0 & L/8 & L/4 & 3L/8 \\ & 5L/8 & & 3L/4 & 7L/8 & L \\ 0 & \text{其它} & & & \end{cases} & (7) \\ ( ) = \begin{cases} K & 0 & L/8 & L/4 & 3L/8 \\ & L/2 & & 5L/8 & 3L/4 & 7L/8 \\ 0 & \text{其它} & & & \end{cases} & (8) \end{cases}$$

式中,  $K$  称为负荷分布特征值, 它是一个正常数,  $(\text{km})$  为至 B 的距离,  $L$  为馈线 AB 的长度。为了简化分析, 特作以下假设:

假设馈线沿线负荷的功率因数相同, 因此有

$$S_{\text{Bp}} = S_{\text{Ap}} = S_{\text{p}} = ;$$

假设馈线沿线电压变化很小, 可以近似认为不变, 表示为  $U_K = 0.5(U_A + U_B)$ 。

下面给出不同负荷分布情况下馈线的电压降落和线损。在分析过程中采用标么值, 其中电压的基准值为  $U_K$ , 根据假设 2, 则可认为沿线电压标么值近似为 1。

#### (1) 负荷分布 1

根据式(1)和假设 1, 有

$$S( ) = \int_0^L K/2d + S_B S_{\text{Bp}} = (K/2 + S_B)e^j \quad (9)$$

$$U = \int_0^L (r + jx)(K/2 + S_B)e^{-j} d = (R + jX)(KL/4 + S_B)e^{-j} \quad (10)$$

式中,  $U$  为从 A 到 B 的电压降落,  $r$  和  $x$  分别为馈线单位长度的电阻和电抗,  $R$  和  $X$  分别为馈线的总电阻和总电抗。进一步有

$$|U| = Z(KL/4 + S_B) \quad (11)$$

式中,  $Z$  为馈线的阻抗的幅值。

从式(11)中可以解出  $K$ , 用  $K_{V1}$  表示, 即:

$$K_{V1} = (4 \frac{|U|}{Z} - 4S_B)/L \quad (12)$$

根据式(9), 沿线的功率损耗  $S$  为:

$$S = \int_0^L (r + jx) \tilde{S}( )^2 d = \int_0^L (r + jx)(K/2 + S_B)^2 e^{-j2} d = (R + jX)(K^2 L^2/12 + S_B^2 + K S_B L/2) e^{-j2} \quad (13)$$

进一步有

$$|S| = \sqrt{R^2 + X^2} (K^2 L^2/12 + S_B^2 + K S_B L/2)$$

$$= Z(K^2 L^2/12 + S_B^2 + K S_B L/2) \quad (14)$$

由于负荷为常数分布, 因此有:

$$S = KL/2 \quad (15)$$

$S_A$ 、 $S_B$ 、 $S$  和  $S$  之间满足如下关系:

$$S_A = S + |S| + S_B \quad (16)$$

即:

$$KL/2 + Z(K^2 L^2/12 + K S_B L/2 + (S_B)^2) + S_B = S_A \quad (17)$$

整理后, 有

$$\begin{cases} A = ZL^2 \\ B = 6L + 6ZS_B L \\ C = 12Z(S_B)^2 + 12S_B - 12S_A \end{cases} \quad (18)$$

解式(17)构成的一元二次方程, 可得出  $K$  值, 用  $K_{\text{Loss1}}$  表示, 即

$$K_{\text{Loss1}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (19)$$

馈线上的有功损耗  $LOSS_1$  可表示为:

$$LOSS_1 = r \int_0^L (K_{\text{Loss1}}/2 + S_B)^2 d = R [K_{\text{Loss1}}^2 L^2/12 + K_{\text{Loss1}} S_B L/2 + (S_B)^2] \quad (20)$$

#### (2) 负荷分布 2

根据式(2)和假设 1, 有

$$S( ) = \begin{cases} Kd + S_B S_{\text{Bp}} \\ (KL/2 + S_B)e^j \\ (K + S_B)e^j & 0 & L/2 \\ (KL/2 + S_B)e^j & L/2 & L \end{cases} \quad (21)$$

$$U = \int_0^{L/2} (r + jx)(K + S_B)e^{-j} d + (r + jx)L(KL/2 + S_B)e^{-j}/2 = (R + jX)(3KL/8 + S_B)e^{-j} \quad (22)$$

进一步有

$$|U| = Z(3KL/8 + S_B) \quad (23)$$

$$K_{V2} = \left[ 8 \frac{|U|}{Z} - 8S_B \right] / 3L \quad (24)$$

根据式(21), 沿线的损耗功率  $S$  为:

$$S = \int_0^{L/2} (r + jx)(K + S_B)^2 e^{-j2} d + (r + jx)L(KL/2 + S_B)^2 e^{-j2}/2 = (R + jX)(K^2 L^2/6 + S_B^2 + 3K S_B L/4) e^{-j2} \quad (25)$$

根据负荷分布, 有  $S = KL/2$

由式(16)可得出下方程:

$$KL/2 + Z(K^2L^2/6 + 3K_S B L/4 + (S_B)^2) + S_B = S_A \quad (26)$$

解式(26),可得出  $K$  值,用  $K_{Loss2}$  表示

$$Loss_2 = R[K_{Loss2}^2 L^2/6 + 3K_{Loss2} S_B L/4 + (S_B)^2] \quad (27)$$

(3)对于负荷分布 3~8,采用类似的方法,可以得出  $K_{V3} \sim K_{V8}$  和  $K_{Loss3} \sim K_{Loss8}$ 。

(4) 负荷密度模型的建模方法

如果实际的负荷分布与前面所述的第  $i$  种分布完全相同,则在相应负荷分布情形下计算出的  $K_{Vi} = K_{Lossi}$ 。但是如果实际的负荷分布与某一种负荷分布形式存在差异,则  $K_{Vi}$  和  $K_{Lossi}$  也有差别,并且一般实际的负荷分布与某种负荷分布形式的差别越大,  $K_{Vi}$  和  $K_{Lossi}$  也相差越大。为此,定义相似系数  $i$  为

$$i = 1/|1 - K_{Lossi}/K_{Vi}| \quad (28)$$

相似系数  $i$  反映了实际负荷分布与给出的负荷分布的近似程度,当实际负荷分布和某一种负荷分布形式完全相同时,式(28)的值为无穷大。因此,按各种负荷分布密度函数计算其相似系数  $i$  值,其中该值最大的分布就是与实际情况最接近的负荷分布函数。

一般,实际当中的任何负荷分布情况都可以通过这八种简单分布的负荷密度函数加权叠加近似获得。某一种负荷分布形式的加权系数  $K_{bi}$  就是该分布形式的相似系数占总相似系数的比例,即

$$K_{bi} = i / \left( \sum_{i=1}^8 i \right) \quad (29)$$

则负荷任意分布情况下,沿线电压降落和线损可以表示为:

$$U = \sum_{i=1}^8 U_i$$

$$Loss = \sum_{i=1}^8 K_{bi} Loss_i$$

式中  $Loss_i$ 、 $U_i$  和  $K_{bi}$  为按第  $i$  类负荷分布计算得到的线损、电压降落和相似系数,  $Loss$  和  $U$  为最终得出的线损和电压降落。在此,  $Loss_i$  和  $U_i$  用  $K_{Vi}$  和  $K_{Lossi}$  的平均值计算得出。

3 计算实例

图 3 给出了用于仿真计算的馈线,为总长为 1 km 的 LG - 120 导线,AB 间共有 9 个负荷,每个负荷间的距离为 0.1 km。假定所有负荷功率因数为 0.85,若无特殊说明各负荷点的负荷为 200 kVA,末端负荷为 1000 kVA。表 1 给出了某一点  $V_m$  的负荷为 800 kVA 时各模型计算结果,表 2 给出了某两个节点  $V_m$  和  $V_n$  的负荷为 800 kVA 时计算结果,表 3 给出了某两个节点  $V_m$  和  $V_n$  的负荷为 2000 kVA 时计算结果。表中线损的相对误差(用  $e\%$  表示)是分别按均匀分布和沃尔什分布所求出的线损值与不经简化的严格计算得出的线损值的差再除以不经简化的严格计算得出的线损值所得的百分数。

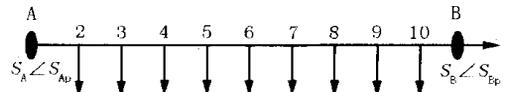


图 3 用于计算的馈线

Fig. 3 A feeder for power flow calculation

表 1 节点  $V_m$  负荷为 800 kVA 时各模型计算结果

Tab. 1 Analysis results when the load of  $V_m$  is 800 kVA

Vm 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			等效负荷密度模型		
	线损/kW	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.
2	10.7	1.042453	22.3	108.4	1.03855	11.8	10.7	1.041409
3	11.5	1.042221	22.3	93.9	1.03855	12.2	5.8	1.041301
4	12.4	1.041988	22.3	79.8	1.03855	12.5	0.7	1.041193
5	13.1	1.041755	22.3	70.2	1.03855	12.8	- 2.3	1.041088
6	13.8	1.041522	22.3	61.6	1.03855	13.1	- 4.9	1.040986
7	14.4	1.041288	22.3	54.9	1.03855	13.4	- 6.7	1.040888
8	15.0	1.041054	22.3	48.7	1.03855	13.7	- 8.5	1.040797
9	15.5	1.040820	22.3	43.9	1.03855	14.0	- 9.8	1.040718
10	16.0	1.040586	22.3	39.4	1.03855	14.3	- 10.4	1.040608

表2 节点  $V_m$  和  $V_n$  负荷为 800 kVA 时各模型计算结果Tab.2 Analysis results when the loads of  $V_m$  and  $V_n$  are both 800 kVA

$V_m$ 和 $V_n$ 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			等效负荷密度模型		
	线损/kW	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.
2,10	17.1	1.040355	27.9	63.2	1.037278	17.2	0.8	1.039749
3,9	17.7	1.040356	27.9	57.6	1.037278	17.2	- 2.4	1.039749
4,8	18.1	1.040357	27.9	54.1	1.037278	17.2	- 4.7	1.039749
5,7	18.5	1.040358	27.9	50.8	1.037278	17.2	- 6.8	1.039749
6,8	20.0	1.039889	27.9	39.5	1.037278	17.9	- 10.3	1.039560
2,4	13.5	1.041757	27.9	106.7	1.037278	15.1	11.5	1.040384
3,5	15.3	1.041291	27.9	82.4	1.037278	15.8	3.1	1.040166
4,6	16.9	1.040825	27.9	65.1	1.037278	16.5	- 2.3	1.039953
7,9	21.3	1.03942	27.9	31.0	1.037278	18.6	- 12.8	1.039416
8,10	22.5	1.038951	27.9	24.0	1.037278	19.9	- 11.3	1.039017

表3 节点  $V_m$  和  $V_n$  负荷为 2000 kVA 时各模型计算结果Tab.3 Analysis results when the loads of  $V_m$  and  $V_n$  are both 2000 kVA

$V_m$ 和 $V_n$ 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			等效负荷密度模型		
	线损/kW	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.	线损/kW	线损相对误差 e %	电压/p. u.
2,10	38.4	1.035664	56.8	47.9	1.032189	39.6	3.1	1.034799
3,9	41.2	1.035670	56.8	37.9	1.032189	39.6	- 3.9	1.034798
4,8	43.8	1.035673	56.8	29.7	1.032189	39.6	- 9.6	1.034796
5,7	45.9	1.035672	56.8	23.7	1.032189	39.6	- 13.7	1.034792
6,8	52.6	1.034253	56.8	8.0	1.032189	42.5	- 19.2	1.034270
2,4	24.1	1.039897	56.8	135.7	1.032189	29.7	23.2	1.034738
3,5	31.7	1.038495	56.8	79.2	1.032189	32.9	3.9	1.036065
4,6	39.0	1.037068	56.8	45.6	1.032189	36.3	- 6.9	1.035401
7,9	58.9	1.032829	56.8	- 3.6	1.032189	50.1	- 14.9	1.032966
8,10	64.9	1.031400	56.8	- 12.5	1.032189	57.5	- 11.4	1.031666

## 4 结论

本文尝试利用沃尔什函数建立负荷密度模型进行配电网简化分析计算,由于计算中考虑了负荷各种分布的影响,并且分别利用了沿线电压降落关系和线损关系,因此得到的结果对于电压降落和线损均有比较好的近似结果。实例计算结果表明计算精度确定得到了改善。

## 5 致谢

作者感谢西安交通大学毕鹏翔博士对本工作的帮助。

## 参考文献:

- [1] Robert P. Broadwater, Asif H. Khan, Hesham E. Shaalan, Robert E. Lee. Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration[J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1993, 8(1): 294 - 300.
- [2] R. E. Lee, C. L. Brooks. A method and its application to evaluate automation distribution control [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1988, 3(3): 1232 - 1240.
- [3] C. S. Chen, M. Y. Cho. Determination of critical switches in distribution system [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1992, 7(3): 1443 - 1449.
- [4] 丁心海, 罗毅芳, 刘巍等. 配电网理论线损计算的实用方法——改进迭代法[J]. 电网技术, 2000, 24(1): 39 - 42.
- [5] T. P. Wanger, A. Y. Chikani, R. Hackam. Feeder reconfiguration for loss reduction: An application of distribution automation [J]. IEEE Trans. On Power Delivery, 1991, 6(4): 1922 - 1931.
- [6] N. Vempati, R. R. Shoullys, M. S. chen, et al. Simplified feeder modeling for load flow calculations [J]. IEEE Trans. On Power Systems, 1987, 2(1): 168 - 174.
- [7] K. L. LO, H. S. NG. Feeder simplifications for distribution system analysis [J]. Electric Power Systems Research, 1997 (42): 201 - 207.

收稿日期: 2002-09-27; 修回日期: 2002-11-22

## 作者简介:

武晓朦(1974-),女,硕士研究生,研究方向为配电网自动化;

刘健(1967-),男,教授,博士,博士生导师,IEEE高级会员,研究兴趣为电力系统分析、配电网自动化。

## Equivalent load density models for feeders based on Walsh function

WU Xiao-meng<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>2</sup>

(1. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** An equivalent load density model based on Walsh function for distribution networks is presented. By solving the voltage drop function and the power loss function of the feeder line, voltage drop and line loss can be acquired without needing the data from each load on the feeder line. Examples are also given with comparison with other simplified analysis results showing the feasibility of the proposed approach.

**Key words:** feeder automation; modeling; load density; power flow analysis; Walsh function

## 中国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会征文通知

全国高等学校电力系统及其自动化专业第十九届学术年会预定2003年10月中旬在四川省成都市西南交通大学举行。现将征文范围、论文排版格式和其它事项通知如下:

## 1 征文范围

- a. 电力系统规划、设计与可靠性;
- b. 电力系统稳态运行分析与控制;
- c. 电力系统暂态过程分析与控制;
- d. 高压直流输电及灵活交流输电技术;
- e. 能量管理系统及配电网自动化;
- f. 电力系统继电保护;
- g. 电力系统自动化及运动技术;
- h. 电力设备监测与故障诊断;
- i. 人工智能在电力系统中的应用;
- j. 电力市场;
- k. 理论电工;
- l. 教学研究及其它。

请按论文范围填写回执中“论文所属方向”栏。

## 2 论文排版格式

a. 论文可用中文或英文撰写。论文应由题目、作者姓名、单位、摘要、关键词、引言、正文、结论和参考文献等组成。

b. 论文各节按1, 2, 3, ... 编排, 引言编号为0, 各分节按1.1, 1.2, ... 格式进行; 各标题前、后各空一行; 摘要不编号。

c. 论文中的公式、插图和表格序号不分节, 一律各用阿拉拍数字统编(如图1, 表5, ... 等)。

d. 应列出主要参考文献, 并在文中引用处的右上角用[ ]中标明其序号, 不要引用尚未发表的资料。参考文献目录书写格式如下:

[序号] 作者姓名. 书名. 出版地: 出版社, 出版年份

[序号] 作者姓名. 论文题目. 刊物名称, 年份, 卷号(期号): 页码

e. 论文用16K纸单面打印, 文字应在纸中间215mm×145mm范围内: 正文用五号宋体, 论文题目用小二号黑体, 各节标题用四号黑体, 各分节标题用小四号宋体; 摘要和参考文献目录用小五号宋体, 摘要、关键词五个字用黑体字。

f. 论文稿内容经次序核对准确后, 页码用铅笔注在右下角。

g. 每篇论文一般不超过6页, 论文被录用时, 从第7页起每超一页除原版面费(另行通知)外, 增付60元。

h. 论文若被录用, 需统一制版印刷, 故请将论文软盘(3.5寸)连同论文稿件一起寄来, 论文应在OFFICE97或OFFICE2000下编辑。请作者认真审核, 避免差错。

## 3 其它事项

a. 论文(包括打印原件)一式四份、论文软盘及“回执”, 请于2003年7月1日前(以邮戳为准)挂号寄到我校。请在信封的背面注明“电自专业年会征文”字样。过期本届年会不录用。为保证稿件邮寄无误, 请作者在稿件寄出10天后向我单位电话确认。

b. 我校将聘请专家对论文进行评审决定是否录用, 并于2003年9月1日前将评审结果通知作者, 如不录用, 恕不退稿。

c. 本届学术年会大会报告人和报告内容由个人自荐、单位推荐、专家评审确定。请本专业的同仁和单位积极推荐, 使中青年学者能脱颖而出。

d. 若有意见、建议和要求, 盼及时通告会议筹备组, 以便改进。

e. 本届年会筹备组通信地址: 四川成都西南交通大学电气工程学院; 邮编: 610031; 会议联系人: 梁玉娟, 易东, 李冀昆; 稿件和软盘收件人: 赵丽平, 解绍锋, 王文文;

电话: (028) 87605291 - 819, 87600366, 88079142

传真: (028) 87605114; E-mail: dianzi\_2003@etang.com

f. 有关会议及其它相关信息我们将及时在网上发布, 请访问 <http://dqxy.swjtu.edu.cn> 查询相关信息。

全国高等学校电力系统及其自动化专业  
第十九届学术年会筹备组

西南交通大学电气工程学院