

采用脉冲函数建立馈线等效负荷密度模型

武晓朦¹, 刘健²

(1. 西安石油大学电子工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 提出了以脉冲函数为基的等效负荷密度模型简化配电网分析的方法。针对 8 种基本负荷分布, 求解馈线两端的电压方程和馈线沿线损耗方程, 分别获得各种分布的特征值和相似系数, 从而不需要量测馈线沿线的各个负荷, 也能计算出馈线电压降落和沿线线损。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, 结果表明提出的方法是可行的。

关键词: 配电网; 数学模型; 负荷密度; 潮流计算; 脉冲函数

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)21-0006-04

0 引言

复杂配电网不仅规模巨大, 而且严重缺乏量测数据, 因此求解比较困难。近年来建立简化模型和进行简化分析的研究十分活跃^[1~7]。文献[1~3]的方法仅能根据统计的用户负荷分布情况获得极为粗糙的结果。文献[4]通过配电变电器的额定功率来摊分馈线出口负荷的方法来确定各个负荷的数据, 结果也非常粗糙。文献[5]将负荷沿馈线按均匀分布来处理的方法(即均匀分布法), 虽然简化了配电网, 但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, 这种方法仍需依赖大量量测数据。

本文提出以脉冲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。

1 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 x 处的负荷。

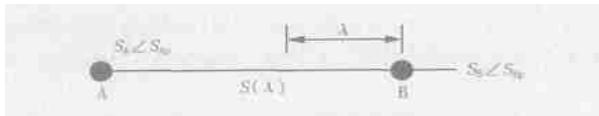


图 1 一段典型的馈线

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 种形式是以脉冲函数为基建立的。

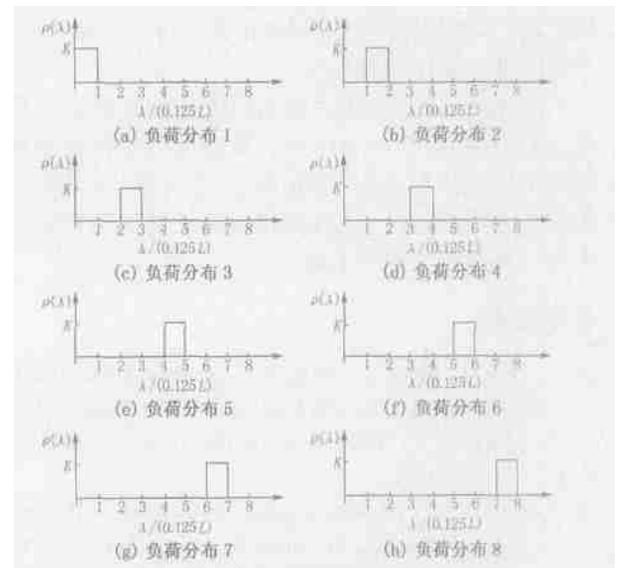


图 2 馈线沿线负荷的 8 种基本分布形式

Fig. 2 Load distribution patterns along the feeder

图中横坐标 x 为至 B 的距离, 单位为 km; 纵坐标 $\rho(x)$ 为负荷分布密度函数, 单位为 kVA/km。分为 8 段的理由是因为作者曾作过其它的简化模型(如沃尔什模型、基本线性模型), 以上两种模型是分为 8 种, 为了对结果进行比较, 所以文中脉冲函数也分为 8 段。但无论分为几段, 均可以得出推导的通式, 修改程序中的通式参数即可得出新的分段下的结果。

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:

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项基金资助 (200137)

$$S(i) = \begin{cases} K & 0 & L/8 \\ 0 & & \end{cases} \quad (1)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & L/8 & L/4 \\ 0 & & \end{cases} \quad (2)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & L/4 & 3L/8 \\ 0 & & \end{cases} \quad (3)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & 3L/8 & L/2 \\ 0 & & \end{cases} \quad (4)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & L/2 & 5L/8 \\ 0 & & \end{cases} \quad (5)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & 5L/8 & 3L/4 \\ 0 & & \end{cases} \quad (6)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & 3L/4 & 7L/8 \\ 0 & & \end{cases} \quad (7)$$

$$S(i) = \begin{cases} K & 7L/8 & L \\ 0 & & \end{cases} \quad (8)$$

式中: K 称为负荷分布特征值,它是一个正常数, L 为馈线 AB 的长度。

为了简化分析,特做以下假设:

假设 1: 假设馈线沿线负荷的功率因数相同,因此有 $S_{Bp} = S_{Ap} = S_p =$;

假设 2: 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

因为 8 种分布的每种分布只是负荷在馈线上的位置不同,所以用递推通式来推导。

针对第 $i(i=1, 2, \dots, 8)$ 种分布,根据式(1)和假设 1,有

$$S(i) = \begin{cases} S_B e^j & \\ (i-1)L/8 & Kd + S_B \quad S_{Bp} = \\ (KL/8 + S_B) e^j & \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_B e^j & 0 & (i-1)L/8 \\ [K - (i-1)KL/8 + S_B] e^j & (i-1)L/8 & iL/8 \\ (KL/8 + S_B) e^j & iL/8 & L \end{cases} \quad (9)$$

$$U = (r + jx)(i-1)LS_B e^{-j} / 8 + \int_{(i-1)L/8}^L (r + jx) [K - (i-1)KL/8 + S_B] e^{-j} d + (r + jx)(8-i)L(KL/8 + S_B) e^{-j} / 8 = (R + jX) [(17-2i)KL/128 + S_B] e^{-j} \quad (10)$$

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

$$|U| = Z[(17-2i)KL/128 + S_B] \quad (11)$$

式中, Z 为馈线的阻抗幅值。

从式(11)中可以解出 K ,用 K_{Vi} 表示,即:

$$K_{Vi} = 128 \left(\frac{|U|}{Z} - S_B \right) / (17-2i)L \quad (12)$$

根据式(9),沿线的功率损耗 S 为:

$$S = (r + jx)(i-1)LS_B^2 e^{-j^2} / 8 + \int_{(i-1)L/8}^L (r + jx) [K - (i-1)KL/8 + S_B] e^{-j^2} d + (r + jx)(8-i)L(KL/8 + S_B)^2 e^{-j^2} / 8 = (R + jX) [(25-3i)K^2 L^2 / 1536 + S_B^2 + (17-2i)KS_B L / 64] e^{-j^2} \quad (13)$$

进一步有

$$|S| = Z[(25-3i)K^2 L^2 / 1536 + S_B^2 + (17-2i)KS_B L / 64] \quad (14)$$

由于负荷为常数分布,因此有:

$$S = KL/8 \quad (15)$$

S_A, S_B, S 和 $|S|$ 之间满足如下关系:

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

即:

$$KL/8 + Z[(25-3i)K^2 L^2 / 1536 + S_B^2 + (17-2i)KS_B L / 64] + S_B = S_A \quad (17)$$

整理后,有

$$\begin{cases} A = (25-3i)11ZL^2 \\ B = 192L + 24(17-2i)ZS_B L \\ C = 1536Z(S_B)^2 + 1536S_B - 1536S_A \end{cases} \quad (18)$$

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

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

馈线上的有功损耗 $LOSS$ 可以表示为:

$$LOSS = \int_0^L r |S(i)|^2 d \quad (20)$$

采用此类推的方法,可以得出 $K_{V1} \sim K_{V8}$ 和

$K_{Loss1} \sim K_{Loss8}$ 。

2) 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 $K_{Vi} = K_{Lossi}$ 。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

$$i = 1 / |1 - K_{LOSSi} / K_{Vi}| \quad (21)$$

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(21)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 8 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

$$K_{bi} = \frac{i}{\sum_{i=1}^8 i} \quad (22)$$

则负荷任意分布情况下,沿线电压降落和线损可以表示为:

$$U = \sum_{i=1}^8 K_{bi} U_i \quad (23)$$

$$Loss = \sum_{i=1}^8 K_{bi} LOSS_i \quad (24)$$

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。

2 计算实例

图 3 给出了用于仿真计算的馈线,为总长 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 1 000 kVA。表 1~表 4 给出了某一节点 V_m 或某两个节点 V_m 和 V_n 的负荷变化时各模型的计算结果。表中线损的相对误差(用 $e\%$ 表示)是分别按均匀分布和脉冲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。表 5 给出了馈线总负荷为 2 400 kVA 时,8 种不同负荷分布下由式(22)确定的等效负荷密度的加权系数(末端负荷为 0)。

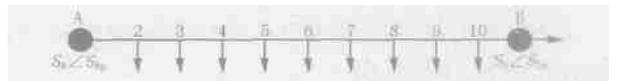


图 3 用于计算的馈线

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

V_m 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			脉冲函数等效负荷密度模型		
	线损 /kW	电压 /p.u	线损 /kW	电压 /e %	电压 /p.u	线损 /kW	电压 /e %	电压 /p.u
2	10.7	1.042 453	22.3	108.4	1.038 55	11.9	11.3	1.042 357
3	11.5	1.042 221	22.3	93.9	1.038 55	12.8	11.2	1.042 053
4	12.4	1.041 988	22.3	79.8	1.038 55	13.5	9.0	1.041 799
5	13.1	1.041 755	22.3	70.2	1.038 55	14.1	8.0	1.041 579
6	13.8	1.041 522	22.3	61.6	1.038 55	14.6	6.0	1.041 4
7	14.4	1.041 288	22.3	54.9	1.038 55	14.9	3.8	1.041 288
8	15.0	1.041 054	22.3	48.7	1.038 55	15.8	5.6	1.041 054
9	15.5	1.040 820	22.3	43.9	1.038 55	16.6	7.1	1.040 820
10	16.0	1.040 586	22.3	39.4	1.038 55	17.3	8.0	1.040 586

表 2 节点 V_m 负荷为 2 000 kVA 时各模型计算结果

Tab. 2 Analysis results when the load of V_m is 2 000 kVA

V_m 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			脉冲函数等效负荷密度模型		
	线损 /kW	电压 /p.u	线损 /kW	电压 /e %	电压 /p.u	线损 /kW	电压 /e %	电压 /p.u
2	13.1	1.04 199	34.2	161.1	1.036 006	16.9	28.9	1.041 402
3	16.2	1.041 293	34.2	161.1	1.036 006	18.8	16.1	1.040 930
4	19.2	1.040 594	34.2	111.1	1.036 006	21.2	10.4	1.040 374
5	22.0	1.039 892	34.2	78.1	1.036 006	24.0	9.0	1.039 614
6	24.6	1.039 189	34.2	55.5	1.036 006	25.6	4.2	1.039 121
7	27.1	1.038 485	34.2	39.0	1.036 006	28.7	5.9	1.038 485
8	29.4	1.037 778	34.2	26.2	1.036 006	31.3	6.4	1.037 778
9	31.5	1.037 071	34.2	16.3	1.036 006	31.2	5.3	1.037 183
10	33.4	1.036 363	34.2	8.6	1.036 006	36.3	8.6	1.036 643

表3 节点 V_m 和 V_n 负荷为 800 kVA 时各模型计算结果Tab.3 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			脉冲函数等效负荷密度模型		
	线损	电压	线损	电压	线损	电压	线损	电压
	/kW	/p.u	/kW	/e %	/p.u	/kW	/e %	/p.u
2,10	17.1	1.040 355	27.9	63.2	1.037 278	19.8	15.5	1.040 254
3,9	17.7	1.040 356	27.9	57.6	1.037 278	19.8	11.6	1.040 254
4,8	18.1	1.040 357	27.9	54.1	1.037 278	19.8	9.1	1.040 254
5,7	18.5	1.040 358	27.9	50.8	1.037 278	19.8	6.7	1.040 254
6,8	20.0	1.039 889	27.9	39.5	1.037 278	21.3	6.6	1.039 889
2,4	13.5	1.041 757	27.9	106.7	1.037 278	15.0	11.4	1.041 721
3,5	15.3	1.041 291	27.9	82.4	1.037 278	17.2	12.1	1.041 074
4,6	16.9	1.040 825	27.9	65.1	1.037 278	18.7	10.7	1.040 597
7,9	21.3	1.039 420	27.9	31.0	1.037 278	23.0	9.6	1.039 420
8,10	22.5	1.038 951	27.9	24.0	1.037 278	24.4	8.3	1.038 951

表4 节点 V_m 和 V_n 负荷为 2 000 kVA 时各模型计算结果Tab.4 Analysis results when the loads of V_m and V_n are both 2 000 kVA

V_m 和 V_n 位置	不经简化的严格计算		均匀分布			脉冲函数等效负荷密度模型		
	线损	电压	线损	电压	线损	电压	线损	电压
	/kW	/p.u	/kW	/e %	/p.u	/kW	/e %	/p.u
2,10	38.4	1.035 664	56.8	47.9	1.032 189	49.0	30.1	1.035 664
3,9	41.2	1.035 670	56.8	37.9	1.032189	48.9	18.7	1.035 670
4,8	43.8	1.035 673	56.8	29.7	1.032 189	48.9	11.6	1.035 673
5,7	45.9	1.035 672	56.8	23.7	1.032 189	48.9	6.5	1.035 672
6,8	52.6	1.034 253	56.8	8.0	1.032 189	57.3	8.9	1.034 253
2,4	24.1	1.039 897	56.8	135.7	1.032 189	31.4	31.2	1.039 028
3,5	31.7	1.038 495	56.8	79.2	1.032 189	65.8	12.8	1.038 378
4,6	39.0	1.037 068	56.8	45.6	1.032 189	44.2	13.3	1.036 648
7,9	58.9	1.032 829	56.8	- 3.6	1.032 189	62.2	5.7	1.032 944
8,10	64.9	1.031 400	56.8	- 12.5	1.037 278	70.8	9.1	1.031 817

表5 不同分布下的加权系数 K_{bi} 的值Tab.5 K_{bi} results when the toll loads are 2 400 kVA

$K_{b1}/(%)$	$K_{b2}/(%)$	$K_{b3}/(%)$	$K_{b4}/(%)$	$K_{b5}/(%)$	$K_{b6}/(%)$	$K_{b7}/(%)$	$K_{b8}/(%)$
7.85	60.36	7.68	4.47	7.81	7.87	7.72	3.85

3 结论

本文尝试了利用脉冲函数建立馈线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,并且考虑了电压降落和功率损耗在确定模型参数中的作用,因此表 1~表 4 得到的计算结果对于电压降落和线损均有比较好的近似结果。由表 5 可以看出,相似系数基本可以反映模型与实际分布的相似程度。

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] Broadwater R P, Khan A H, Shaalan H E, et al. Time Var

ing Load Analysis to Reduce Distribution Losses Through Re-configuration [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8 (1):294-300.

[2] Lee R E, Brooks C L. A Method and Its Application to Evaluate Automation Distribution Control [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(3):1232-1240.

[3] Chen C S, Cho M Y. 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 (DING Xin-hai, LUO Yi-fang, LIU Wei, et al). 配电网理论线损计算的实用方法——改进迭代法 (A New Practical Method for Calculating Line Loss of Distribution Network——Improved Iteration Method) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2000, 24 (1): 39-42.

(下转第 16 页 continued on page 16)

备用辅助服务市场与电量市场之间的综合决策较复杂。合理组织并协调市场、量化备用服务并制定合理的价格、优化系统运行将会是我国电力市场实践面临的难点,这些问题将等待我们进一步的探讨。

参考文献:

- [1] Cheung K W, Shamsollahi P, Asteriadis S, et al. Functional Requirements of Energy and Ancillary Service Dispatch for the Interim ISO New England Electricity Market[A]. IEEE Engineering Society Winter Meeting. New York (USA): 1999. 1. 269-273.
- [2] Alvey T, Godwin D, Ma X W, et al. Security constrained Bid-clearing System for the New Zealand Wholesale Electricity Market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 340-346.
- [3] Danai B, Kim J, Chen A I, et al. Scheduling Energy and Ancillary Service in the New Ontario Electricity Market[A]. IEEE Power Industry Computer Applications Conference. Sydney(Australia):2001. 161-165.
- [4] 美国加州电力市场(California Electricity Market) [EB/OL]. <http://www.caiso.com>.

- [5] 沈瑜,夏清,康重庆(SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chongqing). 中国电力市场模式的探讨(A Novel Model for Restructuring of Electric Power Industry in China) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(4):6-9.
- [6] 李林川,王锡凡,王秀丽(LI Linchuan, WANG Xi-fan, WANG Xi-ri). 基于等效电量函数法的互联电力系统随机生产模拟(Probabilistic Modeling for Interconnected Power Systems Based on the Equivalent Energy Function Approach) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 1996, 16(3):181-184.

收稿日期: 2004-02-07; 修回日期: 2004-03-30

作者简介:

曹娜(1979-),女,硕士研究生,从事电力市场、电力系统运行分析与控制方面的研究; E-mail: peekingirl@163.com

曾次玲(1976-),女,博士研究生,从事电力市场方面的研究;

张步涵(1950-),男,教授,硕士生导师,从事电力系统运行分析与控制、电力市场的研究。

Demand and dispatch of spinning reserve service for power system

CAO Na, ZENG Ci-ling, ZHANG Bu-han

(College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Power reserve ancillary services(AS) play an important role in maintaining power system security and reliability. Spinning reserve is deeply relevant to energy market, and its demand and dispatch attract much attention. The paper gives a power reserve AS model of decoupling spinning reserve from energy markets. With this model, optimal reserve capacity can be determined by maximizing the social benefits of spinning reserve service. By using a heuristic method, case studies for real power systems demonstrate usefulness and efficiencies of the proposed model.

Key words: power market; ancillary services; spinning reserve; social benefits

(上接第9页 continued from page 9)

- [5] Wanger T P, Chikani A Y, Hackam R. Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: An Application of Distribution Automation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(4): 1922-1931.
- [6] Vempati N, Shouly R R, Chen M S, et al. Simplified Feeder Modeling for Load Flow Calculations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1):168-174.
- [7] Lo K L, Ng H S. Feeder Simplifications for Distribution Sys-

tem Analysis[J]. Electric Power Systems Research, 1997, 42: 201-207.

收稿日期: 2004-03-01; 修回日期: 2004-05-19

作者简介:

武晓朦(1974-),女,博士研究生,研究方向为配电网自动化; E-mail: jessica93@163.com

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 pulse function

WU Xiao-meng¹, LIU Jian²

(1. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710065, China; 2. Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: An equivalent load density model based on pulse function for distribution networks is presented. Eight fundamental load distribution patterns are put forward. By solving the voltage drop function and the power loss function of the feeder line, characteristic values together with the corresponding similarity parameters for the eight load distribution patterns are obtained respectively. Consequently, voltage drop and line loss can be acquired without the data from each load on the feeder line. Examples are also given, and the comparison with other analysis results shows the feasibility of the proposed approach.

Key words: distribution network; mathematical model; load density; power flow calculation; pulse function