

## 配电网功率量的逆向潮流追踪方法

吴旭阳, 鲍海

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 为了得到以负荷为主体的配电网中各功率量的关系, 提出了逆向潮流追踪方法。利用功率分布理论, 得到了表示每个负荷与对应损耗之间关系的功率链和每个负荷与对应汲取功率之间关系的功率流。给出正弦稳态形式的负荷—损耗分布系数、负荷—汲取功率流分布系数。将该方法应用到一典型的14节点配电网, 得到各功率量的和与网络原有功率量相等的结论。算例分析结果表明, 单电源网络中正弦稳态功率按照阻抗匹配原则来分配。

**关键词:** 配电网; 功率量; 潮流追踪; 逆向追踪; 阻抗匹配

### Method for backward power flow tracing of power quantities of distribution network

WU Xu-yang, BAO Hai

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Method of backward power flow tracing is proposed for getting the relationship of each power quantity in distribution network. This paper gets power chain containing the relationship between each load and corresponding loss and power stream covering the relationship between each load and extracted power utilizing the theory of power distribution. Load-loss distribution coefficient, and load-extracted power flow distribution coefficient are given in the form of sinusoidal steady-state. This method is adopted to a typical 14-node distribution network, getting the conclusion that the sum of each power quantity equaling to the origin power quantity. Case study shows that in the single source power network, sinusoidal steady-state power follows the principle of impedance matching.

**Key words:** distribution network; power quantities; power flow tracing; backward tracing; impedances matching

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0087-06

## 0 引言

电网功率的来源和去向问题随着电力市场的改革的深入引起了学者们的关注, 潮流追踪问题随着输电成为一种特殊的独立的业务对确定输电费用有着重要影响。功率追踪方法可以分为以下几类: (1) 函数值法<sup>[1-8]</sup>其实是两乘数占其积的比例问题, 是一个没有定义的数学问题。这种方法与潮流计算的结果不相符合。函数值法提出的初衷是给出一个经济分配原则, 并非物理实际。且按固定复数比例分配功率时, 会产生“无中生有”的问题<sup>[9]</sup>。(2) 灵敏度法<sup>[10-11]</sup>用灵敏度矩阵方法描述电能(或电功率)在电网中的分解情况。这种方法会产生多值解。该方法要求电网运行点的轨迹为直线, 且运行区间是一个小邻域。这种方法对整个运行过程可能无效。(3) 电气剖分法<sup>[12]</sup>在没有定义多重注入功率形式的前提下对网络进行等值计算, 试图达到端口等效的目

的。(4) 功率分解方法<sup>[13-15]</sup>将一个潮流断面上的电力网等效为电路网络, 通过理论分析得到了能量线性叠加的电源输出功率、支路传输功率和支路线损解析表达式。从数学上构建了分析电网各处功率关系的理论基础。

以上所列各种方法从电源出发, 研究了输电网络的电源的来源问题, 各个方法都是从电源开始追踪能量的路径。这些方法可以解决电力市场中输电费用、线损成本、阻塞成本<sup>[16-20]</sup>等问题。输电网络中发电机通过网络向负荷供电, 因而用潮流追踪方法描述电源向电网各处供电原则。这些方法关注的重点在于发电机能发出的功率多少, 而认为负荷能够完全消耗。然而, 在中低压配电网中, 情况却不尽然。在配电网中, 每一条馈线可以认为是无穷大电源, 负荷消耗的功率成为关注的焦点。处于电网末端的各个负荷和为了向负荷传输功率而产生的线路损耗之间的解析关系还未被研究过。

本文从负荷功率出发,得到与各个负荷对应的损耗,进而建立它们之间的关系。首次基于功率分解理论进行逆向的潮流追踪,研究多个负荷汲取的功率流在网络中的分布规律,厘清负荷与对应损耗,负荷与汲取电源功率流的关系。该方法揭示了配电网中运行参数与网络固有参数之间的关系。理论证明了电网中能量按照阻抗匹配的原则来分配。本方法为配电网运行优化和参数辨识计算奠定了基础。

## 1 配电网电气参量解析分析

### 1.1 单电源配网电路的矩阵表示

图1为典型的稳态配电网电气结构图,为单电源辐射状网络,该网络含有 $n$ 个节点,节点2至节点 $n$ 共带有 $n-1$ 个负荷。

$$\dot{S}_{Li} = P_{Li} + jQ_{Li} \quad (i=2,3,\dots,n) \quad (1)$$

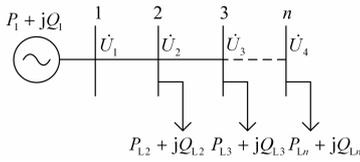


图1 典型 $n$ 节点配电网

Fig. 1 A typical  $n$  nodes distribution network

将图1所示电力网络转换成电路网络后,节点电压导纳矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1q} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2q} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{q1} & Y_{q2} & \cdots & Y_{qq} & \cdots & Y_{qn} \\ Y_{(q+1)1} & Y_{(q+1)2} & \cdots & Y_{(q+1)q} & \cdots & Y_{(q+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nq} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_q \\ \dot{U}_{q+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $Y_{ij}$ 为电网络导纳矩阵的元素; $\dot{U}_i (i=1,2,\dots,n)$ 为第 $i$ 个节点的电压,是未知量; $\dot{I}_{s1}$ 是电源的电流源电流,为已知量。式(2)的解为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \vdots \\ \dot{U}_q \\ \dot{U}_{q+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{21} & \cdots & Z_{q1} & \cdots & Z_{n1} \\ Z_{12} & Z_{22} & \cdots & Z_{q2} & \cdots & Z_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{1q} & Z_{2q} & \cdots & Z_{qq} & \cdots & Z_{nq} \\ Z_{1(q+1)} & Z_{2(q+1)} & \cdots & Z_{q(q+1)} & \cdots & Z_{n(q+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{1n} & Z_{2n} & \cdots & Z_{qn} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{s1} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

### 1.2 配电网各处电气参量解析式

1) 各节点电压为

$$\dot{U}_i = Z_{Li} \dot{I}_{s1}, (i=1,2,\dots,n) \quad (4)$$

2) 电源注入总功率为

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_{s1}^* = Z_{11} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \quad (5)$$

3) 负荷 $i$ 的电流为

$$\dot{I}_{Li} = \dot{U}_i / z_{Li} = Z_{Li} \dot{I}_{s1} / z_{Li}, (i=2,3,\dots,n) \quad (6)$$

则节点 $i$ 负荷消耗的功率为

$$\begin{aligned} \dot{S}_{Li} &= \dot{U}_i \dot{I}_{Li}^* = \dot{U}_i \cdot (\dot{U}_i / z_{Li})^* = \\ & Z_{Li} \dot{I}_{s1} \cdot (Z_{Li} \dot{I}_{s1} / z_{Li})^* = |Z_{Li}|^2 \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* / z_{Li}^* \end{aligned} \quad (7)$$

4) 电源注入节点 $j$ 功率为

$$\begin{aligned} \dot{S}_j &= \dot{U}_j \dot{I}_j^* = Z_{1j} \dot{I}_{s1} \sum_{i \in j} \left( \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{z_{ij}} \right)^* = \\ & Z_{1j} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \sum_{i \in j} \left( \frac{1}{z_{ij}^*} \right) (z_{Li} - z_{1j})^* \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $z_{ij}$ 为 $ij$ 支路阻抗; $\dot{I}_j$ 为与节点 $j$ 相连的支路电流代数和。

5)  $ij$ 支路功率损耗为

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S}_{ij} &= \dot{U}_{ij} \dot{I}_{ij}^* = (z_{Li} - z_{1j}) \dot{I}_{s1} \left( \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_j}{z_{ij}} \right)^* = \\ & \frac{1}{z_{ij}^*} |z_{Li} - z_{1j}|^2 \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \end{aligned} \quad (9)$$

## 2 逆向潮流追踪方法

### 2.1 配电网线损的分解

在图1中,电能由电源经过 $n-1$ 段输电线路分别传输到 $n$ 个负荷,每段输电线路都会产生功率损耗,功率损耗与输电线路电流的平方成正比,输电线路电流又取决于负荷电流,因此,可以建立各个负荷与其损耗的对应关系,逆向潮流追踪就是从负荷出发,解析求出各个负荷所对应的线路损耗、线路传输功率。

线路 $z_{12}$ 上的功率损耗为 $\Delta \dot{S}_{12} = \dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{12}^*$ ,  $\dot{I}_{12}$ 为 $z_{12}$ 上的电流。

$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_{L2} + \dot{I}_{L3} + \cdots + \dot{I}_{Ln} = \sum_{i=2}^n \dot{I}_{Li}$$

$$\Delta \dot{S}_{12} = \dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{12}^* = \left( \sum_{i=2}^n \dot{I}_{Li} \right) z_{12} \left( \sum_{j=2}^n \dot{I}_{Lj}^* \right) =$$

则

$$\sum_{j=2}^n \sum_{i=2}^n \dot{I}_{Li} z_{12} \dot{I}_{Lj}^* = \sum_{j=2}^n \dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{Lj}^*$$

线路 $z_{12}$ 上的功率损耗中包含 $n-1$ 个部分,分别对应于传输 $n-1$ 个负荷功率所产生的功率损耗。其中 $\dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{Lj}^*$ 是为了向负荷 $L_j$ 传输功率引起的损耗,记为 $\Delta \dot{S}_{12 \leftarrow L_j}$ ;于是可得

$$\Delta \dot{S}_{12} = \sum_{i=2}^n \dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{Li}^* = \sum_{i=2}^n \Delta \dot{S}_{12 \leftarrow Li} \quad (10)$$

其中  $\Delta \dot{S}_{12 \leftarrow Li} = (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) \frac{\dot{U}_i^*}{z_{Li}^*} = \dot{I}_{12} z_{12} \dot{I}_{Li}^* =$   
 $(Z_{11} - Z_{12}) \frac{Z_{Li}^*}{z_{Li}^*} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* \quad (i = 2, 3, \dots, n)$

同理可得

$$\Delta \dot{S}_{23} = \dot{I}_{23} z_{23} \dot{I}_{23}^* = \sum_{i=3}^n \dot{I}_{23} z_{23} \dot{I}_{Li}^* = \sum_{i=3}^n \Delta \dot{S}_{23 \leftarrow Li} \quad (11)$$

其中

$$\Delta \dot{S}_{23 \leftarrow Li} = (Z_{12} - Z_{13}) Z_{Li}^* \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* / z_{Li}^* \quad (i = 3, 4, \dots, n)$$

由以上分析可知, 在一个确定的潮流断面下, 各点电压已经确定, 各负荷也已经确定。ΔS<sub>23</sub> 的损耗中, 不含有送往负荷 L<sub>2</sub> 的电流, 只含有送往负荷 L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub> 至 L<sub>q</sub> 的电流。

线路 z<sub>(q-1)q</sub> 上的功率损耗为

$$\Delta \dot{S}_{(q-1)q} = \sum_{i=q}^n \Delta \dot{S}_{(q-1)q \leftarrow Li} \quad (12)$$

此线路的功率损耗包含传输负荷 L<sub>q</sub>, …, L<sub>n</sub> 产生的损耗, 将以上网络的 q-1 条线路上的损耗按照各个负荷所对应的分量进行分解, 可以将原有的网络拆分为 q-1 个子网络, 这 q-1 个子网络称为功率链。每条功率链分别对应每个负荷。

在功率链中, 可建立各损耗值与负荷消耗功率的关系, 定义为负荷—损耗分布系数。负荷—损耗分布系数是将电能输送至该负荷所产生的线路损耗与该负荷功率之比, 物理意义为传输单位负荷功率在线路中产生的功率损耗。负荷 L<sub>q</sub>—联络线路 ij 损耗分布系数为

$$\Delta \dot{S}_{ij \leftarrow Lq} / \dot{S}_{Lq} = Z_{1i} - Z_{1j} / Z_{1q}, \quad i < j \leq q \leq n \quad (13)$$

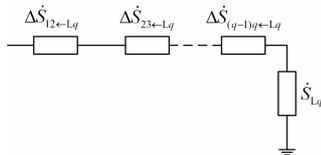


图2 负荷 L<sub>q</sub> 对应的功率链

Fig. 2 Power chain corresponding to load L<sub>q</sub>

负荷—损耗分布系数建立了配电网中运行参数与系统固有参数之间的关系。电力系统运行参数包含发电机发出的有功功率、线路传输功率、负荷消耗功率等, 运行参数会随着系统状态的变化而变化。系统固有参数包括线路阻抗, 网络结构等。在

等式(13)中的左边是负荷 L<sub>q</sub> 对应的线路 ij 的损耗值与负荷 L<sub>q</sub> 消耗的功率, 这两个物理量均为系统运行参数; 等式右边仅包含节点阻抗矩阵的元素, 为系统的固有参数。

## 2.2 配电网节点的负荷汲取功率流的分解

功率链还能从负荷汲取功率流的角度来分析, 按照电网能量的传递关系, 可将以上 n-1 条功率链图转化为反应负荷与对应的负荷汲取功率流之间关系的功率流图。

在负荷 L<sub>n</sub> 对应的功率链中, 流经节点 n-1 的功率即节点 n-1 的负荷汲取功率流为

$$\dot{S}_{(n-1) \leftarrow Ln} = \dot{S}_{Ln} + \Delta \dot{S}_{(n-1)n \leftarrow Ln} = Z_{1(n-1)} Z_{1n}^* \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^* / z_{Ln}^* \quad (14)$$

负荷 L<sub>q</sub> 对节点 j 的汲取功率流为

$$\dot{S}_{j \leftarrow Lq} = \dot{S}_{Lq} + \sum_{i=1}^q \Delta \dot{S}_{i(i+1) \leftarrow Lq} = Z_{11} \frac{Z_{1q}^*}{z_{Lq}^*} \dot{I}_{s1} \dot{I}_{s1}^*, \quad j \leq q \quad (15)$$

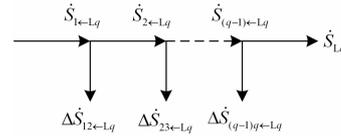


图3 负荷 L<sub>q</sub> 对应的功率流图

Fig. 3 Power stream corresponding to load L<sub>q</sub>

在功率流图中, 可建立汲取功率流与负荷消耗功率的关系, 称为负荷—汲取功率流分布系数:

$$\dot{S}_{j \leftarrow Lq} / \dot{S}_{Lq} = Z_{1j} / Z_{1q} \quad (16)$$

该系数的物理意义为传输单位负荷功率在线路中汲取的功率流值。

由式 (13) 和式 (16) 可知, 负荷—损耗系数和负荷—汲取功率流分布系数经过推导可表示为节点阻抗矩阵中元素的比值, 并不包含其他成分。这说明功率是按照阻抗匹配的原则来分配的。

## 3 算例分析

为验证模型的可行性和有效性, 以图 4 所示某实际配网系统作为仿真算例。图中虚线表示电缆线路, 实线表示电阻线路。该系统潮流计算的数据和结果见表 1 和表 2。

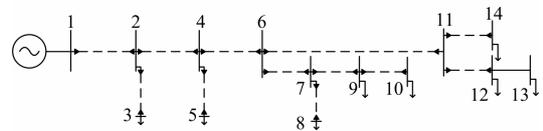


图4 14 节点配电网系统图

Fig. 4 A 14 nodes diagram of distribution system

表 1 14 节点系统母线数据和潮流结果  
Table 1 14 nodes system buses data and power flow calculation result

母线号	母线电压		负荷功率		负荷阻抗	
	幅值/kV	相角/(°)	有功/MW	无功/Mvar	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$
1	10.5	0	0	0	无	无
2	10.26	4.98	0	0	无	无
3	10.24	6.29	1.188	0.408	78.96	27.46
4	10.07	15.60	0	0	无	无
5	10.05	17.07	0.630	0.220	143.04	51.48
6	9.83	29.24	0	0	无	无
7	9.79	28.28	0	0	无	无
8	9.76	29.81	1.584	0.554	53.246	19.72
9	9.74	30.86	1.008	0.264	87.67	24.73
10	9.72	32.17	0.792	0.272	106.09	38.77
11	9.75	32.98	0	0	无	无
12	9.69	35.67	1.8144	0.6288	45.86	17.02
13	9.67	31.75	0.9405	0.323	88.35	32.27
14	9.72	34.18	1.164	0.3996	72.13	26.45

表 2 14 节点系统支路数据  
Table 2 14 nodes system branches data

首末端 母线号	支路阻抗		支路损耗	
	电阻/ $\Omega$	电抗/ $\Omega$	有功/kW	无功/kvar
1-2	0.232	0.059	223.53	56.99
2-3	0.152	0.0169	2.28	0.25
2-4	0.226	0.0339	166.60	24.99
4-5	0.304	0.0338	1.34	0.15
4-6	0.304	0.0456	190.79	28.62
6-7	0.119	0.0465	15.83	6.19
7-8	0.142	0.022	4.21	0.64
7-9	0.224	0.025	8.34	0.93
9-10	0.204	0.0224	1.51	0.17
6-11	0.19	0.038	34.72	6.89
11-14	0.204	0.040	3.27	0.65
11-12	0.190	0.038	17.21	3.41
12-13	0.154	0.172	1.63	1.82

当潮流计算完毕后，将该电力网络转换为如图 5 所示的电路网络。

由式(10)~式(12)能够得出各个负荷对应的线损。由表 3 最后两行知，各负荷对应线损之和等于

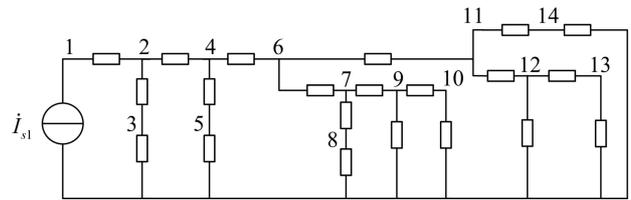


图 5 14 节点电路  
Fig. 5 14 nodes circuit

原始潮流线损。限于篇幅，这里只列出负荷 14 对应的负荷-损耗分布系数，如表 4 所示。表 5 列出了负荷 13 对应的节点汲取功率流。表 6 列出了负荷 13 对应的负荷-节点汲取功率流分布系数。由表 3 纵向分析，线路上的功率损耗是按负荷进行分解的，并且分解后各负荷对应该线路的功率损耗之和与线路的功率损耗相等，在列表里某负荷对应线路的功率损耗为 0 代表该负荷对线路损耗值的贡献为 0，也就证明该负荷对应的功率链中不包含这条线路；由表 3 横向分析，负荷向系统汲取功率的同时，也产生了线路的功率损耗，行表里对应的值即为该负荷对应每条线路的损耗，将这些损耗串连起来就形成了该负荷对应的功率链。

表 4 列出了负荷 14 的负荷-损耗分布系数，其中负荷 14 对应线路 4-6 的系数最大表明负荷 14 消耗的功率的变化对线路 4-6 功率损耗的变化最为敏感，反之负荷 14 对应线路 11-14 的系数最小表明负荷 14 消耗的功率的变化对线路 11-14 功率损耗的变化最为迟钝。表 5、表 6 分别列出了负荷 13 对应的节点汲取功率流和负荷-节点汲取功率流分布系数，负荷 13 对应的节点汲取功率流是负荷 13 对应功率链的潮流表示，负荷-节点汲取功率流分布系数则表示了该负荷功率的变动对应的线路潮流的灵敏程度。

#### 4 结论

(1) 采用电路解析方法，首次对稳态配电网功率参量进行逆流追踪，即负荷通过网络从电源获得功率的解析关系。根据电能的传输规律，将电网中各种功率分配系数串联在一起，形成功率流。

(2) 通过对配电网中各功率参量的解析分析，指出负荷-支路损耗、负荷-节点汲取功率流分布系数只与阻抗有关。证明了稳态配电网功率量是按阻抗匹配原则进行分配的。

表 3 各负荷对应线损  
Table 3 Network loss corresponding to each load

	线路 1-2 /kVA	线路 2-3 /kVA	线路 2-4 /kVA	线路 4-5 /kVA	线路 4-6 /kVA	线路 6-7 /kVA	线路 7-9 /kVA	线路 9-10 /kVA	线路 6-11 /kVA	线路 11-14 /kVA	线路 11-12 /kVA	线路 12-13 /kVA
负荷 3	27.83+ j7.48	2.28+ j0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
负荷 5	15.07+ j4.08	0	12.85+ j2.15	1.34+ j0.15	0	0	0	0	0	0	0	0
负荷 8	39.05+ j10.43	0	33.29+ j5.45	0	41.31+ j6.82	7.39+ j3.10	0	0	0	0	0	0
负荷 9	24.74+ j4.51	0	20.92+ j1.71	0	25.96+ j2.16	4.74+ j1.55	4.64+ j0.36	0	0	0	0	0
负荷 10	19.59+ j5.10	0	16.69+ j2.62	0	20.71+ j3.28	3.71+ j1.53	3.70+ j0.57	1.51+ j0.17	0	0	0	0
负荷 12	45.06+ j11.81	0	38.39+ j6.10	0	47.64+ j7.64	0	0	0	16.09+ j3.21	0	11.33+ j2.25	0
负荷 13	23.39+ j6.09	0	19.93+ j3.13	0	24.73+ j3.92	0	0	0	8.35+ j1.65	0	5.88+ j1.16	1.63+ j1.82
负荷 14	28.80+ j7.48	0	24.54+ j3.84	0	30.44+ j4.8	0	0	0	10.28+ j2.03	3.27+ j0.65	0	0
合计	223.53+ j56.98	2.28+ j0.25	166.61+ j25.00	1.34+ j0.15	190.79+ j28.62	15.84+ j6.18	8.34+ j0.93	1.51+ j0.17	34.72+ j6.89	3.27+ j0.65	17.21+ j3.41	1.63+ j1.82
分解前总 损耗	223.53+j56.99	2.28+j0.25	166.60+ j24.99	1.34+ j0.15	190.79+ j28.62	15.83+ j6.19	8.34+ j0.93	1.51+ j0.17	34.72+ j6.89	3.27+ j0.65	17.21+ j3.41	1.63+ j1.82

表 4 负荷 14 对应的负荷-损耗分布系数

Table 4 Load-loss distribution coefficients corresponding to load 14

	线路 1-2	线路 2-3	线路 2-4	线路 4-5	线路 4-6	线路 6-7	线路 7-9	线路 9-10	线路 6-11	线路 11-14	线路 11-12	线路 12-13
负荷 14	0.0241- j0.0018	0	0.0199- j0.0035	0	0.0247- j0.0043	0	0	0	0.0084- j0.0012	0.0027- j0.0004	0	0

表 5 负荷 13 对应的节点汲取功率流

Table 5 Power stream extracted from the node corresponding to load 13

	节点 12/kVA	节点 11/kVA	节点 6/kVA	节点 4/kVA	节点 2/kVA	节点 1/kVA
负荷 13	942.13+ j324.82	948.01+ j325.98	956.36+ j327.63	981.09+ j331.55	1001.02+ j335.47	1024.41+ j341.56

表 6 负荷 13 对应的负荷-节点汲取功率流分布系数

Table 6 Load-extracted power flow distribution coefficients corresponding to load 13

	节点 12	节点 11	节点 6	节点 4	节点 2	节点 1
负荷 13	1.0021+ j0.0012	1.0081+ j0.0004	1.0166- j0.0008	1.0414- j0.0051	1.0616- j0.0079	1.0859- j0.0098

## 参考文献

- [1] BIALEK J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1996, 143(4): 313-320.
- [2] 王锡凡, 王秀丽. 电流追踪问题[J]. 中国科学(E辑), 2000, 30(3): 265-270.  
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li. The question of current tracing[J]. Science in China: Series E, 2000, 30(3): 265-270.
- [3] 王锡凡, 王秀丽, 郑斌. 电力市场过网费的潮流分析基础[J]. 中国电力, 1998, 31(6): 6-9.  
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, JIA Bin. Fundament of loadflow analysis in wheeling costing-loss allocation problem[J]. Electric Power, 1998, 31(6): 6-9.
- [4] MACQUEEN C N, IRVING M R. An algorithm for the allocation of distribution system demand and energy losses[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(1): 338-343.
- [5] KIRSCHEN D S, ALLAN R N, STRBAC G. Contribution of individual generators to loads and flows[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, PWRS-12(1): 52-60.
- [6] BIALEK J, TAM D B. Tracing the generator's output[J]. Proceedings of IEE International Conference on Opportunities and Advances in Int, 1996: 133-136.
- [7] BIALEK J. Identification of source-sink networks[J]. Proceedings of Fourth IEE Conference on Power System Control and Management, 1996: 200-204.
- [8] BIALEK J. Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998: 1185-1193.
- [9] 常乃超, 郭志忠. 网损分摊问题的思考[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 43-47.  
CHANG Nai-chao, GUO Zhi-zhong. Pondering on the loss allocation problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 43-47.
- [10] WAI Y NG. Generalized generation distribution factors for power system security evaluations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(3): 1001-1005.
- [11] CHANG Y C, YANG W T, LIU C C. Improvement on GGDF for power system security evaluation[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(2): 82-85.
- [12] 于继来, 汤奕. 交流支路和节点的联合电气剖分[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(16): 37-42.  
YU Ji-lai, TANG Yi. United electrical dissection of AC branch and bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 37-42.
- [13] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.  
BAO Hai, MA Qian. Physical distribution mechanism of network loss for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.
- [14] 李伟. 基于分量理论的功率分解新方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.  
LI Wei. Research on a new method of power decomposition based on component theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [15] 颜丽, 鲍海. 基于电流分布的电网功率分布因子的计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 80-85.  
YAN Li, BAO Hai. Algorithm of power distribution factors based on current distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 80-85.
- [16] 张森林, 王钦, 张尧, 等. 基于可中断负荷拍卖模型的电力双边交易阻塞管理[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 122-128.  
ZHANG Sen-lin, WANG Qin, ZHANG Yao, et al. An interruptible load auction model based transmission congestion management in bilateral electricity markets[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 122-128.
- [17] 杨右虹, 杨宗权, 潘永贺, 等. 联营-双边混合交易模式下的阻塞费用分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 50-53.  
YANG You-hong, YANG Zong-quan, PAN Yong-he, et al. Congestion cost allocation under pool and bilateral transactions mode[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 50-53.
- [18] 钱程, 鲍海. 电力市场下边际成本计算方法的解读[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 7-10.  
QIAN Cheng, BAO Hai. Unscrambling of marginal cost algorithm in power market[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 7-10.
- [19] 吴英俊, 汤奕, 李扬. 基于电气剖分方法的 TCSC 成本费用分摊[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 137-143.  
WU Ying-jun, TANG Yi, LI Yang. A proposal for investment recovery of TCSC device based on electrical dissecting method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 137-143.
- [20] 冯天民, 刘宝柱, 鲍海. 一类含 CCCS 网络形成节点阻抗矩阵的新算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 139-144.  
FENG Tian-min, LIU Bao-zhu, BAO Hai. A novel algorithm for building Z-matrix of electric power network including CCCS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 139-144.

收稿日期: 2013-09-30; 修回日期: 2014-01-16

作者简介:

吴旭阳(1987-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: xiaoyeren@vip.qq.com

鲍海(1968-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制。