

电网中流通功率和耗散功率及其分量的定义与分析

彭建春

(深圳大学 机电与控制工程学院, 广东省 深圳市 518060)

Definitions and Analysis of Passing-Power and Dissipation-Power and Their Components in Electric Networks

PENG Jian-chun

(College of Mechatronics & Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: The power defined in electric circuit theory is the element's absorbing power, physically based on the work done by electric field force on charges. However, the distribution of elements' absorbing power fails to show the continuity of energy flow in electric networks. The calculation-formula-based flowing power given by electric power network theory shows the continuity of energy flow, but is not applicable to asymmetric networks. In this paper, to reveal the continuity of energy flow in electric networks, the passing-power and dissipation-power are defined based on the spatial energy flow density of electromagnetic fields. The relationship between the dissipation-power and the absorbing power defined in circuit theory is analyzed, and a method to solve passing-power in a special class of symmetric electric networks is derived. The difficulties in the solution of passing-power in general electric networks are pointed out. Furthermore, the passing-power component and dissipation-power component are defined based on continuity of energy flow and conservation of energy to quantitatively show the proportion of each source to a passing-/dissipation-power. The difficulties in the solution of passing-power component are analyzed. It is pointed out that there are wide applications for passing-power and its components.

KEY WORDS: electric network; energy flow density; passing-power; dissipation-power; power component

摘要: 电路理论中的功率是基于电场力对电荷做功的元件吸收功率,它在电网中的分布不能展现能量流动的连续性。电力网中基于算式定义的流动功率虽能展现能量流动的连续

性,但不适用非对称电网。基于电磁场的空间能流密度给出了电网中流通功率和耗散功率的定义,以展现能量在电网中流动的连续性。分析了耗散功率和电路理论中吸收功率之间的关系。推导了一类对称电网中流通功率的求解方法,剖析了一般电网中流通功率的求解难点。基于电磁能流的连续性和能量守恒给出了耗散功率分量和流通功率分量的定义,以进一步展示耗散和流通功率中各电源的分量大小。最后分析了电网中流通功率分量的求解难点,展望了流通功率及其分量的应用前景。

关键词: 电网; 能流密度; 流通功率; 耗散功率; 功率分量

0 引言

20世纪末,席卷全球的电力工业市场化改革对电力网分析理论提出了许多新挑战。至今近20年过去了,却仍有许多问题悬而未决。“沿电力线路的流动功率中各电源的分量是多少”的问题就是其一^[1-8]。电力网是对称的,该问题在非对称电网中还升级为“沿一条支路的(总)流动功率是多少?沿一条支路的流动功率中各电源的分量又是多少”等。

电力网理论中,沿一相线路的流动功率或潮流(功率)术语是基于算式“相导线对中性点的电压乘以通过相导线的电流”命名的^[9]。虽然它在电力网中的分布能展现能量流动的连续性,但一般电网由于不存在像电力网那样使结构和参数对称的中性点、该术语失效;电路理论中,从未论及沿一条支路的流动功率问题,只论及基于电场力对电荷做功的元件吸收功率。元件吸收功率在电网中的分布不能展现能量流动的连续性;另外,按已有电路知识,功率不像电流和电压那样满足叠加原理,因此该问题更是尚无方法求解的难题。沿电网支路的流动功率及

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677015)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50677015).

其分量问题是涉及电路理论的深层次认知性科学问题，其研究有着重要的理论和工程实际意义。

按电磁场理论，电网中的能量是通过运动形态的电磁场传播的^[10]。电磁场理论揭示了物理系统中各点的电磁过程和电磁能量的分布规律，是电磁场问题的一般理论。以 Ohm 定律和 KCL/KVL 为核心的电路理论可完全从电磁场理论派生，它是描述电磁波长远大于电路尺寸(似稳条件)的电磁规律的特殊理论。要透过已有电路理论、揭示更深层次的电网中功率流动的规律，需要回归到电磁场理论。为此，本文从平行双输电线电网出发，基于电磁场理论给出了流通功率和耗散功率及其分量的定义，剖析了它们的求解难点，并指出流通功率及其分量有着广泛的应用前景。

1 平行双输电线电网中的能流密度

1.1 能流密度的定义

按 Poynting 定理^[10]，非静电系统中任意点的能流密度 S (Poynting 向量)等于该点的电场强度向量 E 又乘磁场强度向量 H ， $S=E \times H$ (W/m²)。 S 取 E 和 H 的叉乘方向。下面从图 1(a)的平行双输电线电网出发，基于能流密度向量分析电磁能流的空间分布。

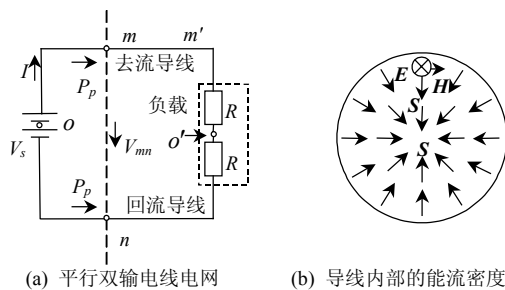


图 1 平行双输电线电网和导线内部的能流密度
Fig. 1 Two-parallel-line circuit and energy flow density in a conductor

1.2 导线内部的能流密度

图 1(a)的电网由一个直流电压源 V_s 、一个阻性负载(2R)和 2 条平行且同型号的有损电线构成。电源电势为 V_s 、通过输电线的电流为 I 。下面考察图 1(a)中去流导线段 mm' 内部的能流密度分布。

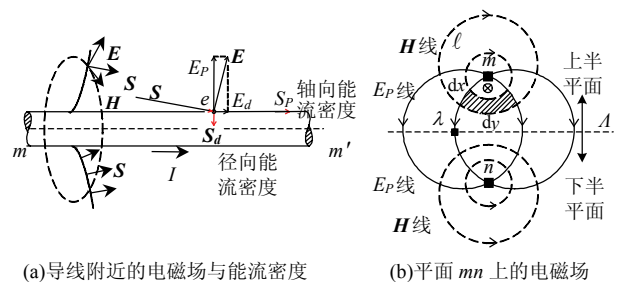
按金属电子论，导体内部的电场强度 E 等于电流密度 δ 乘导体电阻率 ρ ， $E=\rho\delta$ 。导体内只有沿导线轴线方向(简称轴向)流动的电流、没有沿导线射径方向(简称径向)的电流。因此导体内部的轴向电场强度为 $E_d=\rho\delta$ 、径向电场强度为 $E_p=0$ ，它们在导线截面上均匀分布；另外，电流的轴向流动使导线

内部磁场 H 沿以导线轴线为中心的同圆心切线方向。这样导线内部由 $E \times H$ 决定的能流密度向量的径向分量为 $S_d=E_d \times H=\rho\delta \times H$ (指向导线轴心)、而轴向分量为 $E_p \times H=0$ (指向负载)。可见，导线内部只向导线本体传输能量、不向负载传输能量。由于 H 正比于 I 、 $E_d=\rho\delta$ 在导线截面上均匀分布，导线内部径向的能流密度在表面处最大、越接近轴心越小、轴心处为零。定性地看，导线内部的能流逐步被其本身吸收，它向导线电阻的发热散失提供能量(参见 2.1 节的定量证明)。图 1(b)刻画了向负载方向看时，去流导线内部电磁功率流动的景象。

回流导线内部的能流密度分布同去流导线。

1.3 导线附近空间的能流密度

对图 1(a)中的去流导线段 mm' ，由于它与电源正极相连而表面呈正电荷分布，使去流导线的电位比附近空间的高。因此去流导线附近空间的电场强度(E)沿导线射径方向，如图 2(a)中的 E 线所示。图中 E 的方向还稍向导线轴心倾斜，这是因为导线存在电阻的缘故。另外，该导线段周围的磁场沿以导线轴线为中心的同圆心切线方向，如图 2(a)中的 H 线所示。这样导线附近空间由 $E \times H$ 决定的能流密度向量 S 是斜向的，它指向负载并稍向导线轴心倾斜，如图 2(a)中的 S 线所示。图 2(a)刻画了导线附近空间电磁功率流动的景象。



(a)导线附近的电磁场与能流密度 (b)平面 mm 上的电磁场

图 2 输电线周围的电磁场与能流密度
Fig. 2 Electromagnetic fields and energy flow density around a conductor

对图 2(a)中去流导线段 mm' 附近空间的某点 e ，电场强度 E 可分解为指向负载的轴向分量 E_d 和沿导线射径方向的径向分量 E_p ，而该点的磁场强度 H 的方向为垂直穿出纸面。故 e 点的能流密度向量 S 可分解为 2 个分量：其一是轴向能流密度 $S_p=E_p \times H$ (指向负载)；其二是径向能流密度 $S_d=E_d \times H$ (指向导线轴心)，如图 2(a)中的 S_p 和 S_d 箭头线所示。

对回流导线，由于它与电源负极相连而表面呈负电荷分布。同理，回流导线附近空间的能流密度

向量仍指向负载并稍向导线轴心倾斜。

1.4 导线内外能流密度的特点

综合上面的分析可见:

导线内部的轴向能流密度为零,导线内部不向负载传输能量。导线内部的径向能流密度正比于导体的电阻率、且越接近导线轴心越小。它向导线电阻的发热散失提供能量。按能量守恒,导线电阻的发热散失功率等于通过导线表面的径向能流(即径向能流密度沿导线表面的定积分,单位为W)。

按能量守恒,导线外部的径向能流(即径向能流密度沿包围导线的柱面定积分)等于通过导线表面的径向能流,两者可合二为一研究。

导线外部的轴向能流密度大于零,它是沿导线向负载传输能量的能流部分,应独立研究。

可见,沿导线传输的全部电磁能流从其外部的轴向能流和通过导线表面的径向能流2个方面就能完整描述。下面从这2个方面基于电磁场的能流密度给出流通功率和耗散功率的时域定义。

2 耗散功率

2.1 耗散功率的定义

定义1: 径向能流密度 S_d 沿导线段表面的定积分值(用 P_d 表示)为该导线段的耗散功率。

图1(a)中半径为 c 、长度为 ℓ 、电流为 I 、电阻率为 ρ 的导线段 mm' , 其耗散功率求解如下:

按金属电子论,均质导线截面上某点(含表面点)的电流密度 $I/(\pi c^2)$ 乘导线电阻率 ρ , 就是该点的电场强度 $E_d = \rho I/(\pi c^2)$ 。导线表面的磁场强度为 $H = I/(2\pi c)$ 。因此导线表面各处径向的能流密度为 $S_d = E_d \times H = \rho I^2/(2\pi^2 c^3)$ 。导线段 mm' 的表面积为 $2\pi c\ell$ 。用 $dx dy$ 表示导线表面的一个元面积,按定义1得导线段 mm' 的耗散功率为

$$P_d = \iint S_d dx dy = \rho I^2 / (2\pi^2 c^3) \cdot 2\pi c\ell = I^2 \rho \ell / (\pi c^2) = I^2 R_{mm'} = V_{mm'} I = V_{mm'}^2 / R_{mm'} \quad (1)$$

其中: $R_{mm'} = \rho \ell / (\pi c^2)$ 是该导线段的电阻; $V_{mm'}$ 是该导线两端间的电压。式(1)的推导可参见文献[10]。

导线段的耗散功率等于它两端的电压乘以通过它的电流。这与电路理论中基于电场力对电荷做功定义的元件吸收功率的算法一样。式(1)的结果定量地证实了1.1节的分析:导线内部的能流逐步被其本身吸收,它向导线电阻的发热散失提供能量。

从电磁场角度看,负载电阻消耗功率时的能流行为和导线电阻发热散失时一样,能量都是沿垂直

其表面方向穿入内部后被逐步吸收和转化的。这正是本文称定义1的功率为(消)耗散(失)功率的缘故。即耗散功率对应导线(负载)电阻时就是导线(负载)的发热散失功率(消耗功率)。

结论1: 电网中一段有损导线或一个负载电阻的耗散功率等于它两端的电压乘以通过它的电流。

注意:虽然定义1基于电磁场给出的耗散功率大小与电路理论中定义的元件吸收功率相等,但两者的物理意义不同:前者是转化成散失热能的过程之前电磁能流的行为,即它沿垂直元件表面方向流入其内部、大小等于穿过导线表面的能流密度的面积分;而后者是转化成散失热能的过程之中电磁能流的行为,即它通过电场力对电荷做功实现能量转化。电场力做功的速度等于每s流过导线截面的电荷 I 在导线内所受的电场力 IE (牛顿)乘以电荷的位移 ℓ (导线段长度), $IE\ell = IV_{mm'}$ (因为 $V_{mm'} = E\ell$)。耗散功率的概念透过已有电路知识、更深刻地反映了电磁能流被元件转化之前的行为。

2.2 耗散功率的求解方法

按结论1,一段有损导线或一个负载电阻的耗散功率等于它两端的电压乘以通过它的电流。不管电网结构如何,上述电流和电压都可用经典电路理论求解。故定义1的耗散功率虽基于电磁场给出,但它能在电路理论范畴内求解、无需涉足电磁场。

3 流通功率

3.1 流通功率的定义

本文称电源(负载)内部1/2电势(电压)处的 $o(o')$ 点为电源(负载)的中心。由于图1(a)电网中的双输电线同型号且平行(等长),该电网的结构和参数关于电源中心和负载中心对称。按电路定律还可知其电源中心与负载中心等电位、可视为一点,即图1的电网还是电源和负载共中心的特殊电网。

在图1(a)中,过去流导线上的点 m 做其垂线与回流导线相交于点 n ,则 m 和 n 是去流与回流导线上的互对称点。过 m 、 n 点垂直于导线的平面 mn 上,去流与回流导线附近空间的 H 线和 E_p 线的分布如图2(b)所示^[10]:各导线的 H 线族是包围该导线轴线的偏心圆族(见虚线), E_p 线族是从 m 指向 n 、与 H 线正交的弧线族(见实线)。

电网向负载方向传输的能量是通过电磁场沿两导线周围的空间流动。考虑到平行双输电线电网既关于电源中心对称、又关于负载中心对称,沿双

导线向负载方向的流动功率可分成 2 等份，沿每条导线的流动功率就是其中的一等份。这样沿一条导线的流动功率可基于轴向能流密度定义如下。

定义 2: 过去流导线上某点及其回流导线上的对称点做垂直于导线的无限平面，称轴向能流密度 S_p 沿该无限平面的定积分值的一半(用 P_p 表示)为去流导线在该点(回流导线在对称点)的流通功率。

流通功率是沿导线向负载方向的流动功率。

3.2 关于电源中心和负载中心对称的电网中流通功率的求解

图 1 是关于电源中心和负载中心对称的简单直流电网，其中的流通功率求解如下：

按 3.1 节的分析，向负载方向看平面 mn 时，图 1(a)电网中的 H 线与 E_p (E 的径向分量)线将整个平面 mn 划分成无数正交的网孔，如图 2(b)中的阴影网孔所示。用 $dx dy$ 表示网孔的元面积 (位于两导线之间的内侧和外侧的情况一样)。单位时间内垂直穿过 $dx dy$ 的轴向能流为 $E_p H dx dy$ ，它沿无限大平面 mn (用 Γ 表示)的定积分的一半为

$$P_p = \frac{1}{2} \iint_{\Gamma} E_p H dx dy \quad (2)$$

在图 2(b)的无限平面上做线段 mn 的垂直平分线 A ，则无限平面 Γ 被直线 A 平分上下两半。上、下半平面上的轴向能流密度 $E_p H$ 以及 E_p 和 H 线的形状都关于直线 A 对称。因此式(2)中沿无限平面 Γ 的定积分等于沿上半平面(用 Γ' 表示)定积分的 2 倍。

$$P_p = \iint_{\Gamma'} E_p H dx dy = \int_m^{\lambda} E_p dx \oint_{\ell} H dy \quad (3)$$

其中 ℓ 是环绕去流导线的闭合路径， λ 是直线 A 上的点，见图 2(b)。考虑到从 m 点到 n 点的 E_p 线族的形状关于直线 A 对称(如 λ 就是其中的一个对称点)、且电场强度的线积分等于电压，即

$$\int_m^{\lambda} E_p dx = 0.5 \int_m^n E_p dx = 0.5 V_{mn} \quad (4)$$

其中 V_{mn} 是去流导线上的 m 点与回流导线上的对称点 n 之间的电压。又由安培环路定理得

$$\oint_{\ell} H dy = I \quad (5)$$

其中 I 是通过去流导线的电流。

将式(4)(5)代入式(3)得

$$P_p = 0.5 V_{mn} I = V_{mo} I = V_{on} I \quad (6)$$

其中 V_{mo} 和 V_{on} 分别是图 1(a)中的 m 点和 n 点与电源中心 o 之间的电压， $V_{mo} = V_{on} = 0.5 V_{mn}$ 。

结论 2: 电源中心和负载中心对称的电网中，

导线某点的流通功率等于通过它的电流乘以该点与电源中心之间的电压。

关于电源中心和负载中心对称的电网中，流通功率能在电路理论范畴内求解、无需涉足电磁场。定义 2 给出的流通功率概念，透过已有电路知识，从电磁场角度更深刻地反映了能量沿电网支路向负载方向的流动行为。

3.3 电力网中的流通功率

电力网通常指三相对称的稳态电网，它的特点之 1 是：每相的拓扑结构和参数相同、或关于各电源、各负载的中性点对称。特点之 2 是：一相电源/负载的电势/电压与其它两相的合成值大小相等、方向相同，一相导线的电流总是沿其它两相回流(即一相导线的回流线是其它两相导线)。按 3.1 节关于电源(负载)中心的概念，电力网中三相电源/负载的中性点就是电源/负载的中心，即电力网是关于电源中心和负载中心对称的一类特殊电网。

因此可直接运用结论 2：电力网(瞬时)单相某点的流通功率等于该点至中性点的电压(相电压)乘以通过相导线的电流(离开中性点方向为正)。有功是时均功率，故单相有功流通功率等于相电压相量点乘相电流相量(因为 $|\vec{V}||\vec{I}|\cos(\vec{V}\vec{I}) = \vec{V} \cdot \vec{I}$)。而按电力网理论，单相有功潮流值也等于相电压相量点乘相电流相量。可见，电力网中，有功流通功率等于有功潮流，即有功潮流就是沿线路向负载方向有功流动功率。注意，电力网中的“有功潮流”是基于算式直接命名的^[9]，缺失有功潮流就是沿线路向负载方向的流动功率的物理和数学论证。基于流通功率定义的分析弥补了这一缺失。

3.4 一般电网中流通功率的求解难点

图 3 是含 3 个电源和 6 个电阻的简单直流电网。图中电阻是负载或导线的等值电阻(连线为无损线)。图中还标出了以大地为零电位的电网节点电压。下面分析图 3 中任一支路某点、如支路 R_3 在 a 点(即首端)的流通功率的求解问题。

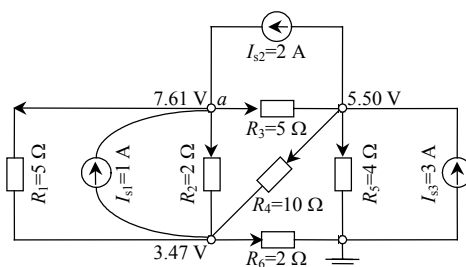


图 3 直流电网
Fig. 3 DC electric network

显然,图3的电网既不关于任何电源中心对称、也不关于任何负载(即电阻)中心对称,它是非对称的一般电网,不能用结论2求流通功率。

欲求支路 R_3 在 a 点的流通功率,按定义2需要找出 R_3 的回流支路。从图3可知, R_3 的回流支路是 I_{s2} 、 R_4 和 R_6 3条的总和(因为通过它们的电流与 R_3 的等大反向),即 R_3 不存在明确的单条回流支路、尚无方法确定 a 点的回流支路对称点。故一般电网中的流通功率按定义2目前尚无方法求解。

电能是通过运动形态的特殊物质“电磁场”沿支路传播的,它既有能量、又有质量。因此像图1(a)中去流导线在 m 点的流通功率那样、支路 R_3 在 a 点的流通功率是客观存在的(有能量和质量)。对这种一般结构的电网,支路某点的流通功率究竟如何求解呢?这实际上是已有电磁场理论和电路理论都未曾论及的一个难题。

4 耗散功率分量与流通功率分量

4.1 耗散功率分量

电网中,任一线路或负载耗散的功率都是由所有电源共同作用产生的。而能量通过电磁场这种运动形态的特殊物质传播,因此某支路耗散的功率中一个电源的分量是多少的问题是一个客观问题。下面基于电磁场给出耗散功率分量的时域定义。

定义3:在电网的所有电源共同作用下,任一支路 l 耗散的功率中对应某电源 k 的激励、并满足以下2个条件的功率部分,称为支路 l 上电源 k 的耗散功率分量。

1) 针对原始电网结构和参数,完全根据Maxwell的电磁场方程求解。

2) 任一支路上各电源的耗散功率分量之和等于该支路的总耗散功率。

在复频率中,储能元件的时均功率为零,它只消耗无功;电阻无储能特性,它只消耗有功;再考虑到电路理论中的3大基本定律(Ohm定律和KCL、KVL)可从Maxwell的电磁场方程派生,因此定义3给出的时域中耗散功率分量的大小等于文献[11]中给出的复频率中的策动(耗散)功率分量。

10余年来,作者从电源激励同步增长和定积分理论、两步联盟博弈、弱条件-证据思想、独立性损耗灵敏度4个不同角度给出了求解耗散功率分量的、殊途同归的算法结论^[12-15]:一个元件上某电源的耗散功率分量,等于该电源单独激励时元件的响

应电流相量点乘该元件的总响应电流相量、再乘以该元件的电阻。

耗散功率分量的这种算法与相关算法的比较将另文讨论。

4.2 流通功率分量的定义

和耗散功率分量类似,沿任一电网支路的流通功率中各电源的分量也是客观存在的。下面基于电磁场给出流通功率分量的时域定义。

定义4:在电网的所有电源共同作用下,任一支路 l 某点的流通功率中对应某个电源 k 的激励、并满足以下4个条件的功率部分,称为支路 l 该点电源 k 的流通功率分量。

1) 针对原始电网结构和参数,完全根据Maxwell的电磁场方程求解。

2) 任一支路某点,各电源的流通功率分量之和等于支路该点的总流通功率。

3) 做只包含任一节点的任意封闭曲面,各电源沿所有支路流出(流出为正)该封闭曲面的流通功率分量的代数和等于零。

4) 做只包含任一电源的任意封闭曲面(电源内阻置于封闭曲面外),该电源沿所有支路流出(流出为正)封闭曲面的流通功率分量之和等于它发出的功率。

条件1)给出了求解流通功率分量的算法要求,即完全依从电磁场(从而电路)的客观规律;条件2)确保支路上的能流平衡;条件3)确保通过节点的能流的连续性;条件4)确保电源的能量守恒。

4.3 流通功率分量求解的探讨

在电磁场和电路理论中,至今既无类似定义4的流通功率分量的定义、更无相关的求解方法。从定义2上看,流通功率是电场强度和磁场强度的非线性函数、不满足叠加原理。因此电网中支路某点各电源的流通功率分量不可能通过叠加原理来求取。按3.4节的分析,求解一般电网中流通功率的大小尚属难题,毫无疑问,求解流通功率分量是在理论层次上更为复杂的难题。

电力网理论中,虽然基于算式“相导线对中性点的电压乘以通过相导线的电流”命名的潮流就是相导线的流通功率,但考虑定义4的条件时,已有的潮流分解算法:如直流潮流法^[9]、基于比例共享假定的方法^[11-7]、直接定义法^[8]等,求得的还不是定义4的流通功率分量。因为:1)直流潮流法将支

路有功潮流近似表达成除参考节点电源外的电源发出有功的线性函数, 这使参考节点的电源在各支路上的流通功率分量为零、不满足定义 4 中的条件 4); 2) 基于比例共享假定的方法假定“流出节点的功率(或电流)中某电源所占的比例等于它的流入量占总流入量的比例”, 这是极强条件的假定, 它有凌驾于电磁场和电路规律之上的嫌疑、让定义 4 的条件 1) 难以信服; 3) 直接定义法将对应某电源的潮流复功率分量定义为“支路总端电压与该电源单独激励下的支路响应电流共轭值的乘积”, 若可, 则完全有理由又定义为“支路总电流共轭值与该电源单独激励下的支路响应端电压的乘积”。然而, 这 2 个定义得到的潮流分量在量值上并不相等、存在不可调和的矛盾。

值得注意的是, 流通功率分量和流通功率一样是客观存在的(有能量和质量), 因此也必然可解。

5 电网中流通功率与耗散功率的关系

用点 e 表示一段有损导线或一个负载(统称元件)的等值电阻、用无损导线作元件之间的连接线, 则图 2(a)中导线段 mm' 附近空间的分散场功率可用流通功率和耗散功率集总描述, 如图 4 所示。即: 输入元件等值电阻处的流通功率被分解成 2 个分量: 其一是透入元件内部的耗散功率; 其二是继续向前传输的输出流通功率。

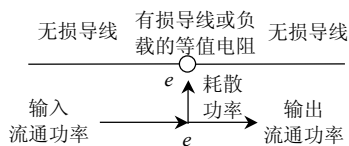


图 4 流通功率与耗散功率的关系

Fig. 4 Relationship between passing-power and dissipation-power

可见, 对任意结构电网中的元件, 流通功率和耗散功率具有如下关系:

输出流通功率和耗散功率是同一输入流通功率的 2 个分量, 逻辑上两者是同级并行关系。

耗散功率位于并消耗在元件内部, 流通功率位于元件附近空间、是向负载方向传播的电磁功率。

输入流通功率等于输出流通功率加耗散功率。这正是能流沿电网元件(支路)流动连续性的体现。考虑该点和定义 4 中条件 3) 要求的“节点能流连续性”, 流通功率和耗散功率一起就能完整描述电网中能量流动的连续性。

6 应用

无论是用作信息处理的电信网还是功率输送的电力网, 能量都是通过电磁场传输的。因此本文基于电磁场给出的流通功率及其分量有着广泛的工程应用前景。如电力网中, 流通功率及其分量不仅展现沿一条线路的总有功潮流, 而且展现总有功潮流中各电源的分量大小。按定义 4, 流通功率分量完全遵循电磁场规律(从而遵循电路规律), 因此比已有电力网中的潮流分解结果更科学, 这将为定制和调控能量高速公路上的电能提供更高效可靠的工具。流通功率分量可应用于电力网规划、安全校正、优化调度和稳定控制。它有助于更高效地调整发电机出力、快速消除关键线路的安全和稳定隐患、改善电网运行的经济性能。

流通功率及其分量的解答将全面揭示电网中功率流分布的客观规律, 弥补已有电路理论中元件吸收功率的相互孤立性缺陷, 展示能量在电网中流动连续特征。

本文基于电磁场定义的耗散功率对应电路理论中的元件吸收功率, 其分量的应用在文献[11]中已有分析, 此处不再赘述。

7 结论

导线内部的径向能流密度在导线表面处最大、越接近导线轴心越小。导线内部只传输供其本身发热散失的电能量、不向负载传输能量。导线内部传输的电能量来自导线附近空间的径向能流。

导线附近空间的轴向能流对应电网向负载方向传输的流通功率。沿任意电网支路(元件)传输的能流用流通功率和耗散功率两者才能完整描述。电网某元件处的输出流通功率和元件耗散功率是同级并行关系。结构和参数关于所有电源中心和负载中心对称的电网中, 导线某点的流通功率等于通过导线的电流乘以该点与电源中心之间的电压。

非对称电网中的流通功率、以及对称和非对称电网中的流通功率分量, 目前都尚无方法求解、有待深入研究。

参考文献

- [1] Bialek J. Tracing the flow of electricity[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 1996, 143(4): 313-320.
- [2] Kirschen D, Strbac D. Tracing active and reactive power between generators and loads using real and imaginary currents[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(4): 1312-1318.

- [3] 王秀丽, 王锡凡. 利用电流的实部与虚部分量进行复功率追踪[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 10-13.
Wang Xiuli, Wang Xifan. Complex power flow tracing via real and imaginary current components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 10-13(in Chinese).
- [4] 李卫东, 孙辉, 武亚光. 潮流追踪迭代算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 38-42.
Li Weidong, Sun Hui, Wu Yaguang. An iterative load flow tracing method[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 38-42(in Chinese).
- [5] 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 Jilai, Tang Yi. United electrical dissection of AC branch and bus[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(16): 37-42(in Chinese).
- [6] 谢开贵, 周家启. 基于有向通路的潮流跟踪新方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 87-91.
Xie Kaigui, Zhou Jiaqi. A new power flow tracing method based on directed path[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 87-91(in Chinese).
- [7] Wu Z Q. Determination of the branch power and loss caused by node injection power[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib, 2003, (6): 722-726.
- [8] 乔振宇, 陈学允, 张粒子, 等. 功率分解潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 77-79.
Qiao Zhenyu, Chen Xueyun, Zhang Lizi, et al. A new concept of the separation of electrical power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 77-79(in Chinese).
- [9] Grainger J, Stevenson W. Power system analysis[M]. New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994: 329-379.
- [10] Pollack G L, Stump D R. Electromagnetism[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2005: 252-416.
- [11] 彭建春. 支路来源功率分量和支路策动功率分量的定义及分析[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 24-29.
Peng Jianchun. Definitions of branch's originating power component and branch's driven power component and their analysis[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 24-29(in Chinese).
- [12] Peng J C, Jiang H. Contributions of individual generators to complex power losses and flows—part 1: fundamental theory[J]. IEE Proc-Gener Transm Distrib, 2002, 149(2): 182-185.
- [13] 彭建春, 江辉. 基于两步联盟博弈的输电网损耗分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 57-63.
Peng Jianchun, Jiang Hui. A two-step coalitional game based transmission losses allocation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 57-63(in Chinese).
- [14] Peng J C, Jiang H, Song Y H. A weakly conditioned imputation of an impedance-branch dissipation power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(4): 1312-1318.
- [15] Peng J C, Jiang H, Xu G, et al. Independent marginal losses with application to locational marginal price calculation[J]. IEE Gener Transm Distrib, 2009, 3(7): 679-689.



彭建春

收稿日期: 2009-11-20。

作者简介:

彭建春(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统安全经济运行与控制、电力市场等研究, E-mail: jcpeng@163.com。

(责任编辑 王晔)