

功率理论定义中的参考点选择方法

田铭兴^{1,2}, 王江彬^{1,2}, 赵远鑫^{1,2}

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 功率理论定义中的参考点选择问题是一个非常基础而又没有得到统一解决的问题。首先根据多端电路端电流必须满足电路基尔霍夫电流定律(KCL)的要求, 得到了参考点选择时受到的约束条件; 其次, 证明考虑约束条件时参考点选择的唯一性, 并从众多可供选择的参考点中找到唯一满足约束条件的参考点; 最后, 给出了参考点选择的具体方法, 并从工程应用角度对参考点选择方法进行简化。以广义瞬时功率理论为例, 对所提方法进行进一步解释和兼容性讨论, 并对广义瞬时功率理论采用的电流分解方法与功率定义方法进行修正, 从而使针对具体电路的功率量成为唯一确定值。

关键词: 功率理论; 多端电路; 参考点; 约束条件
中图分类号: TM 714.1 **文献标识码:** A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.01.013

0 引言

功率理论定义中的参考点选择问题是一个非常基础的问题, 但一直没有得到统一解决。众多研究者选用电路中性点作为参考点^[1-5], 又有研究者选用地作为参考点^[6-9], 还有研究者直接利用搭建虚拟中性点的方法来解决参考点选择问题^[10-13]。另外, 现有的大多数功率理论定义方法^[10, 13-15]所定义的无功功率和视在功率受参考点选择的影响^[13], 这意味着在空间选择不同的参考点应用同一种功率理论定义方法计算所得的无功功率和视在功率完全不同, 从而导致功率因数也会因参考点选择的不同而不同。功率因数是用来衡量电路本身特性的, 而参考点选择则完全遵循功率理论研究者的为人意愿, 因此功率因数受参考点选择影响是不合理的。

然而, 参考点选择时到底应该遵守怎样的依据, 很少有文献对此做专门的分析。这导致人们没有认识到参考点选择时受到的约束, 认为功率理论研究中的参考点可以任意选择, 从而导致现有功率理论定义时参考点选择的方法多种多样, 这时无功功率和视在功率受参考点选择影响的本质原因容易被忽略。实际上, 除了少数情况^[16-17]外, 电路分析和电磁场分析问题求解过程中的参考点确实可以任意选择, 这是导致目前功率理论定义过程中参考点任意选择的根源。

针对这些问题, 本文首先明确了功率理论定义中

参考点选择时应该受到的约束, 然后在此基础上证明了所选择参考点的唯一性, 最后以广义瞬时功率理论为例对本文参考点选择方法进行了说明, 并使针对具体电路的功率量成为唯一确定值, 这对视在功率和功率因数等量的计算都是有利的。

1 参考点选择的约束条件

图 1 为 n 端电路示意图, 该 n 端电路的 n 个端子可以接系统电源, 也可以接补偿器。选择空间任意一点 x (这里的 x 表示空间中所有可供选择参考点构成的集合 X 中的任意一个元素, 即 $x \in X$) 作为参考点进行分析。

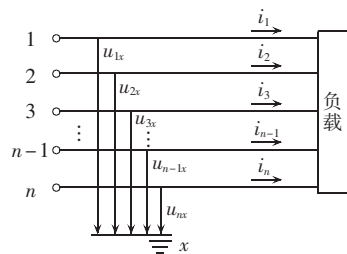


图 1 选择任意参考点的多端电路

Fig.1 Multi-terminal circuit with arbitrary point as reference point

图 1 中的 $u_{1x}, u_{2x}, u_{3x}, \dots, u_{n-1x}, u_{nx}$ 表示选择任意参考点 x 后电路各个端子相对于参考点 x 的瞬时电压, 这些瞬时电压构成的向量称为瞬时电压向量, 记作:

$$\mathbf{u}_{nx} = (u_{1x} \ u_{2x} \ u_{3x} \ \cdots \ u_{n-1x} \ u_{nx})^T \quad (1)$$

$i_1, i_2, i_3, \dots, i_{n-1}, i_n$ 表示电路各个端子上的瞬时电流, 这些瞬时电流构成的向量称为瞬时电流向量, 记作:

$$\mathbf{i}_n = (i_1 \ i_2 \ i_3 \ \cdots \ i_{n-1} \ i_n)^T \quad (2)$$

针对图 1 的 n 端电路, 在已知式 (1) 与式 (2) 给出的瞬时电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 与瞬时电流向量 $\mathbf{i}_n$ 的基础上, 广义瞬时功率理论^[6-10]可以将电流分解为:

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51367010); 甘肃省科技计划项目 (17JR5RA083); 甘肃省自然科学基金资助项目 (1610-RJZA042); 兰州交通大学优秀科研团队资助项目 (201701)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51367010), Science and Technology Program of Gansu Province (17JR5RA083), the Natural Science Foundation of Gansu Province (1610RJZA042) and Program for Excellent Team of Scientific Research in Lanzhou Jiaotong University (201701)

$$\mathbf{i}_n = \frac{\bar{p}}{a} \mathbf{u}_{nx} + \frac{\tilde{p}}{a} \mathbf{u}_{nx} + \frac{\bar{q}}{a} \mathbf{u}_{nx} + \frac{\tilde{q}}{a} \mathbf{u}_{nx} = \frac{1}{a} (\bar{p} \mathbf{I}_n + \tilde{p} \mathbf{I}_n + \bar{q} + \tilde{q}) \mathbf{u}_{nx} \quad (3)$$

其中, $a = |\mathbf{u}_{nx}|^2$ 为电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 长度的平方; $\mathbf{I}_n$ 为单位矩阵。

$$\mathbf{I}_n = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)_{n \times n}$$

$$\mathbf{p} = \mathbf{u}_{nx}^T \mathbf{i}_n$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} 0 & i_1 u_{2x} - u_{1x} i_2 & \cdots & i_1 u_{nx} - u_{1x} i_n \\ i_2 u_{1x} - u_{2x} i_1 & 0 & \cdots & i_2 u_{nx} - u_{2x} i_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_n u_{1x} - u_{nx} i_1 & i_n u_{2x} - u_{nx} i_2 & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{p}$ 为电路的瞬时有功功率; $\mathbf{q}$ 为瞬时虚功率矩阵^[6-10]; $\bar{p}$ 为 p 的直流分量; $\tilde{p}$ 为 p 的交流分量; $\bar{q}$ 为 $\mathbf{q}$ 的各个元素取直流量构成的矩阵; $\tilde{q}$ 为 $\mathbf{q}$ 的各个元素取交流量构成的矩阵。

针对 $\bar{p}$ 、 $\tilde{p}$ 、 $\bar{q}$ 、 $\tilde{q}$ 这 4 个功率量, 考虑到每个功率量等于 0 或者不等于 0 的情况, 4 个功率量构成的组合数目为:

$$N = C_2^1 \cdot C_2^1 \cdot C_2^1 \cdot C_2^1 = 16 \quad (4)$$

由于 $\bar{p} \mathbf{I}_n = 0 \Leftrightarrow \bar{p} = 0$, $\tilde{p} \mathbf{I}_n \neq 0 \Leftrightarrow \tilde{p} \neq 0$, $\bar{p} \mathbf{I}_n = 0 \Leftrightarrow \tilde{p} = 0$, $\tilde{p} \mathbf{I}_n \neq 0 \Leftrightarrow \tilde{p} \neq 0$, 那么根据式(4)可以将这 16 种组合形式具体分为 5 种情况。

a. 4 个功率量全部等于 0 的一种情况, 具体为:

$$\bar{p} = \tilde{p} = 0, \quad \bar{q} = \tilde{q} = 0 \quad (5)$$

对于一个实际电路, 式(5)所示的这种情况并不存在, 这里不予分析。

b. 4 个功率量中有一个功率量不等于 0 的 4 种情况, 具体为:

$$\begin{cases} \bar{p} \neq 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)的 4 个式子分别代入式(3), 可以在这 4 个式子对应的 4 种情况下各求解出一个电流。无论所求解的这个电流由系统电源提供还是由补偿器提供, 所供出的电流必须满足电路的基尔霍夫电流定律(KCL), 这就要求:

$$u_{1x} + u_{2x} + \cdots + u_{nx} = 0 \quad (7)$$

比如, 将式(6)的第一个式子代入式(3), 可以得:

$$\mathbf{i}_n = \frac{\bar{p}}{a} \mathbf{u}_{nx} \quad (8)$$

无论怎样选择参考点, 式(8)中电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 长度的平方 a 都会满足式(9):

$$a = |\mathbf{u}_{nx}|^2 \neq 0 \quad (9)$$

由式(6)中的第一个式子和式(9)可以得:

$$\frac{\bar{p}}{a} \neq 0 \quad (10)$$

无论是系统电源还是补偿器提供式(8)的这部分电流, 结合式(8)与式(10)可以看出, 要使电路满足 KCL, 那么式(7)就必须成立。其他情况可作类似分析。

c. 4 个功率量中有 2 个功率量不等于 0 的 6 种情况, 具体为:

$$\begin{cases} \bar{p} \neq 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} \neq 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} \neq 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} \neq 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} \neq 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)的 6 个式子代入式(3), 可以在这 6 个式子对应的 6 种情况下各求解 2 个电流。无论这 2 个电流中的 1 个或 2 个电流由系统电源(或补偿器)进行提供, 要使提供的电流满足 KCL, 则电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的元素必须满足式(7)。

d. 4 个功率量中有 3 个功率量不等于 0 的 4 种情况, 具体为:

$$\begin{cases} \bar{p} \neq 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} = 0 \\ \bar{p} \neq 0, \tilde{p} = 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} \neq 0 \\ \bar{p} \neq 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} = 0, \tilde{q} \neq 0 \\ \bar{p} = 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)的 4 个式子代入式(3), 可以在这 4 个式子对应的 4 种情况下各求解 3 个电流。无论是这 3 个电流中的 1 个、2 个或者 3 个电流由系统电源(或补偿器)进行提供, 要使提供的电流满足 KCL, 则电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的元素也必须满足式(7)。

e. 4 个功率量都不等于 0 的一种情况, 具体为:

$$\bar{p} \neq 0, \tilde{p} \neq 0, \bar{q} \neq 0, \tilde{q} \neq 0 \quad (13)$$

将式(13)的式子代入式(3), 可以在这种情况下求解 4 个电流。无论是求解的电流中的 1 个、2 个、3 个或者 4 个电流由系统电源(或补偿器)进行提供, 电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的元素也必须满足式(7)。

式(7)就是多端电路参考点选择时的电压固定约束条件。这个约束条件是所有功率理论定义所必须遵守的, 否则定义出的电流分量就不满足电路 KCL, 即不满足电路的电荷守恒定律。这说明, 如果参考点可以任意选择, 那么从数学上按照式(3)给出的电流分解将有无数种分解结果, 但是只有满足式(7)的参考点选择约束条件才能够使电流的数学分解与电路的物理定律对应起来, 否则电流的分解将只有数学意义。

2 参考点选择的唯一性证明

考虑如图 2 所示的 n 端电路,图中标出了该电路的端子与端子之间的 n 个瞬时电压 u_{12} 、 u_{23} 、 $\cdots$ 、 u_{n-1n} 、 u_{n1} ,这些瞬时电压都称为瞬时端电压。

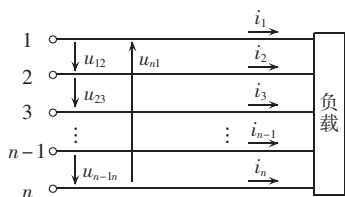


图 2 多端电路的瞬时端电压分析

Fig.2 Analysis of instantaneous terminal voltage for multi-terminal circuit

结合图 1 和图 2,可以得出两图中的瞬时电压具有式(14)所示关系:

$$\begin{cases} u_{1x} - u_{2x} = u_{12} \\ u_{2x} - u_{3x} = u_{23} \\ u_{3x} - u_{4x} = u_{34} \\ \vdots \\ u_{n-2x} - u_{n-1x} = u_{n-2n-1} \\ u_{n-1x} - u_{nx} = u_{n-1n} \\ u_{nx} - u_{1x} = u_{n1} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)表述成矩阵形式为:

$$\mathbf{A} \mathbf{u}_{nx} = \mathbf{u}_{nL-L} \quad (15)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{u}_{nx} = (u_{1x} \ u_{2x} \ u_{3x} \ \cdots \ u_{n-1x} \ u_{nx})^T$$

$$\mathbf{u}_{nL-L} = (u_{12} \ u_{23} \ u_{34} \ \cdots \ u_{n-2n-1} \ u_{n-1n} \ u_{n1})^T$$

由于式(15)中矩阵 $\mathbf{A}$ 的秩为 $n-1$,也即式(14)的方程有 $n-1$ 个独立方程,而其未知数 u_{1x} 、 u_{2x} 、 u_{3x} 、 $\cdots$ 、 u_{n-1x} 、 u_{nx} 却有 n 个,所以式(14)的方程有无数个解。然而,考虑到式(7),那么由式(14)的方程结合式(7)的电压约束条件所得的式(14)的解必定是唯一的。

实际上,这一结论也可以通过以下的简单分析得到。

针对图 1,假设选定的满足式(7)的参考点是集合 X 中的元素 $x(x \in X)$ 点,即:

$$u_{1x} + u_{2x} + \cdots + u_{nx} = 0 \quad (16)$$

假设集合 X 中还有一个参考点 $y(y \in X)$ 也满足:

$$u_{1y} + u_{2y} + \cdots + u_{ny} = 0 \quad (17)$$

由于:

$$\begin{bmatrix} u_{1y} \\ u_{2y} \\ \vdots \\ u_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{2x} \\ \vdots \\ u_{nx} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{yx} \\ u_{yx} \\ \vdots \\ u_{yx} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(16)~(18)可得:

$$u_{yx} = 0 \quad (19)$$

考虑到式(19),可将式(18)化简为:

$$\begin{bmatrix} u_{1y} \\ u_{2y} \\ \vdots \\ u_{ny} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1x} \\ u_{2x} \\ \vdots \\ u_{nx} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式(20)也表明针对具体电路这样的参考点是唯一的。

3 参考点选择的具体方法

由式(14)的方程结合式(7)的约束条件解得:

$$\mathbf{u}_{nx} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} u_{12} + u_{13} + \cdots + u_{1n} \\ u_{21} + u_{23} + \cdots + u_{2n} \\ u_{31} + u_{32} + \cdots + u_{3n} \\ \vdots \\ u_{n-11} + u_{n-12} + \cdots + u_{n-1n} \\ u_{n1} + u_{n2} + \cdots + u_{nn-1} \end{bmatrix} \quad (21)$$

然而,式(21)在应用时存在困难,因为测量电压比较多而且有重复测量的弊端。因此有必要对这种参考点选择方法进行简化。

式(21)可以表达为:

$$\mathbf{u}_{nx} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (u_{1k} - u_{ik}) \\ \sum_{i=1}^n (u_{2k} - u_{ik}) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n (u_{nk} - u_{ik}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{1k} - u_0 \\ u_{2k} - u_0 \\ \vdots \\ u_{nk} - u_0 \end{bmatrix} = \mathbf{u}_{k0} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{k0} = (u_{1k} - u_0 \ u_{2k} - u_0 \ \cdots \ u_{nk} - u_0)^T \\ u_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_{ik} \end{cases}$$

其中, u_{1k} 、 u_{2k} 、 $\cdots$ 、 u_{nk} 为以图 1 的 n 端电路的第 $k(k=1, 2, \cdots, n)$ 端为参考点时各个端子相对于电路 k 参考端的瞬时电压。

式(22)表明,按照本文思路选择参考点时,可以首先选择电路的第 k 端为参考点,进而得到各个端子相对于电路 k 参考端的各个瞬时电压,然后从这些瞬时电压分量中剔除瞬时电压 u_0 就可以得到唯一满足式(7)的电压向量。式(22)就是对式(21)进行简化得到的简化参考点选择方法,这时得到的电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 就是以满足式(7)约束条件的唯一参考点作为电路参考点得到的电压向量,并且这时 $\mathbf{u}_{nx} = \mathbf{u}_{k0}$ 。为了叙述方便,将这个唯一参考点称为参考点 x_0 。

4 参考点选择方法的讨论

4.1 兼容性讨论

由式(21)可得,当 $n=3$ 时,电压向量 $\mathbf{u}_{3x}$ 为:

$$\mathbf{u}_{3x} = \mathbf{u}_{k0} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{12} + u_{13} \\ u_{21} + u_{23} \\ u_{31} + u_{32} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} u_{12} - u_{31} \\ u_{23} - u_{12} \\ u_{31} - u_{23} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{23} \\ u_{31} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式(23)即为文献[11]给出的用于三相三线制电路参考点选择的方法。

4.2 考虑参考点选择的电流分解方法

对于图 1 的 n 端电路,当选择任意一个参考点 x 作为电路参考点时,式(3)的电流分解可以修正为:

$$\mathbf{i}_n = \frac{\bar{p}}{b} \mathbf{u}_{k0} + \frac{\tilde{p}}{b} \mathbf{u}_{k0} + \frac{\bar{q}}{b} \mathbf{u}_{k0} + \frac{\tilde{q}}{b} \mathbf{u}_{k0} = \frac{1}{b} (\bar{p} \mathbf{I}_n + \tilde{p} \mathbf{I}_n + \bar{q} + \tilde{q}) \mathbf{u}_{k0} \quad (24)$$

其中, $b = |\mathbf{u}_{k0}|^2$ 为电压向量 $\mathbf{u}_{k0}$ 长度的平方。

式(24)就是选择任意参考点 x 时的电流分解方法,该分解方法实际上不受参考点选择的影响,其针对具体电路分解出的电流分量值是唯一的。

4.3 考虑参考点选择的功率定义方法

设电路选择任意一个参考点 x 后得到的电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 和电流向量 $\mathbf{i}_n$ 分别如式(1)和式(2)所示,那么该理论中的各个功率量定义为^[10]:

$$\begin{cases} p = \mathbf{u}_{nx}^T \mathbf{i}_n \\ q_x = |\mathbf{q}| = \sqrt{\text{tr}(\mathbf{q}^T \mathbf{q})} / 2 \\ s_x = |\mathbf{u}_{nx}| |\mathbf{i}_n| \end{cases} \quad (25)$$

其中, $\text{tr}(\mathbf{q}^T \mathbf{q})$ 表示矩阵 $\mathbf{q}^T \mathbf{q}$ 的迹; $|\mathbf{u}_{nx}|$ 表示电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的长度; $|\mathbf{i}_n|$ 表示电流向量 $\mathbf{i}_n$ 的长度。

式(25)中瞬时有功功率 p 与下标 x 无关是因为 p 不受参考点选择的影响,为了后续叙述方便,这里予以证明。

假设从空间所有可以选择的参考点集合 X 中任意选择 2 个参考点 x 和 y (x 和 y 表示集合 X 中的 2 个不同的元素,即 $x \in X, y \in X$),则以 x 为参考点求得的瞬时有功功率 p_x 为:

$$p_x = \sum_{k=1}^n u_{kx} i_k = \sum_{k=1}^n (u_{ky} - u_{xy}) i_k = \sum_{k=1}^n u_{ky} i_k - u_{xy} \sum_{k=1}^n i_k \quad (26)$$

由于式(26)中:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (27)$$

则由式(27)可得:

$$p_x = \sum_{k=1}^n u_{kx} i_k = \sum_{k=1}^n (u_{ky} - u_{xy}) i_k = \sum_{k=1}^n u_{ky} i_k = p_y \quad (28)$$

式(28)表明,选择任意 2 个参考点 x 和 y 计算

所得的瞬时有功功率是相等的。即对于同一个电路,瞬时有功功率 p 是定值,它不会受参考点选择影响。

式(25)的定义等价于:

$$\begin{cases} p = |\mathbf{u}_{nx}| |\mathbf{i}_n| \cos \varphi_x \\ q_x = |\mathbf{u}_{nx}| |\mathbf{i}_n| \sin \varphi_x \\ s_x = |\mathbf{u}_{nx}| |\mathbf{i}_n| \end{cases} \quad (29)$$

其中, $\varphi_x = \langle \mathbf{u}_{nx}, \mathbf{i}_n \rangle = \arccos[\mathbf{u}_{nx}^T \mathbf{i}_n / (|\mathbf{u}_{nx}| |\mathbf{i}_n|)]$, 表示电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 与电流向量 $\mathbf{i}_n$ 之间的夹角。

式(25)与式(29)的定义均满足式(30):

$$p^2 + q_x^2 = s_x^2 \quad (30)$$

按照传统思路,参考点可以任意选择,那么选择不同的参考点 x 时 $\mathbf{u}_{nx}$ 并不相同,得到的 $|\mathbf{u}_{nx}|$ 也不相同,然而不同参考点下的 $\mathbf{i}_n$ 和 $|\mathbf{i}_n|$ 以及瞬时有功功率 p 却是相同的。选择不同参考点时对应的电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 和电流向量 $\mathbf{i}_n$ 之间的关系如图 3 所示。

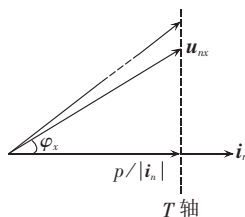


图 3 任意选择参考点时所得的电压、电流关系

Fig.3 Relationship between voltage and current with arbitrary point as reference point

图 3 中 $\mathbf{u}_{nx}$ 表示以任意参考点 x 作为电路参考点时所得的电压向量,其与电流向量 $\mathbf{i}_n$ 之间的夹角为 φ_x 。当 $\varphi_x > 0$ 时,电压向量超前电流向量的角度为 φ_x ; 当 $\varphi_x = 0$ 时,电压向量和电流向量重合;当 $\varphi_x < 0$ 时,电压向量滞后电流向量的角度为 $|\varphi_x|$ 。

由式(29)可知,当选择不同的参考点时,电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的箭头将在 T 轴(T 轴的具体位置由 $p/|\mathbf{i}_n|$ 决定)上下移动。这时按照式(29)计算出的无功功率和视在功率的值也在变动。选择任意参考点 x 作为参考点时按照式(29)和式(30)可得这时功率量之间的关系如图 4 所示。

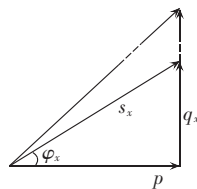


图 4 选择任意参考点时的功率关系

Fig.4 Power relationship with arbitrary point as reference point

当选择不同的参考点时,电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 与电流向量 $\mathbf{i}_n$ 之间的夹角 φ_x 以及电压向量 $\mathbf{u}_{nx}$ 的长度 $|\mathbf{u}_{nx}|$ 都在变动,这导致图 4 中的无功功率 q_x 和视在功率 s_x 也会变动,这是导致无功功率和视在功率受参考点选择影响的原因。选择不同的参考点,计算出的满足式(30)的无功功率和视在功率不同,所以针对同一个电路计算出的无功功率和视在功率将有无数个,这是不合理的。

假设选择满足式(7)条件的唯一参考点 x_0 作为参考点,这时得到如式(22)所示的电压向量 $\mathbf{u}_{k0}$ 。电压

向量 u_{k0} 超前电流向量 i_n 的角度为 φ_0 , 这时得到的电压向量 u_{k0} 与电流向量 i_n 之间的关系如图 5 所示。

图 5 中电压向量 u_{k0} 、电流向量 i_n 及其之间的夹角 φ_0 都是唯一确定的, 电压向量 u_{k0} 的箭头也不在 T 轴上下移动, 而是固定在 T 轴的具体位置。这时得到的功率量为:

$$\begin{cases} p = |u_{k0}| |i_n| \cos \varphi_0 \\ q_0 = |u_{k0}| |i_n| \sin \varphi_0 \\ s_0 = |u_{k0}| |i_n| \end{cases} \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可得这时功率量之间的关系如图 6 所示。

式(31)以及图 6 中的功率量就是针对具体电路给出的选择满足式(7)约束条件的唯一参考点计算得到的功率量, 这时得到的功率量也是唯一确定的, 计算得出的功率因数也是唯一确定值。

5 结论

针对功率理论研究中参考点选择方法非常不统一的情况, 考虑了参考点选择时应该受到的约束条件, 该约束条件使参考点选择方法具体化、明确化。通过本文研究, 主要得出以下结论:

a. 与电路分析和电磁场分析的许多问题不同, 功率理论定义中的参考点选择受到式(7)约束条件的约束, 从而使得可供选择的参考点成为唯一确定的;

b. 无功功率和视在功率受参考点选择影响的原因是传统思路认为参考点可以任意选择, 当选择不同的参考点时所对应的电压向量及其长度都不会对应相同, 从而得出“无功功率和视在功率受参考点选择影响”的结论;

c. 明确参考点选择约束条件基础上的电压向量和电流向量都是唯一确定的, 由它们所定义的无功功率和视在功率都是唯一确定值, 这为视在功率和功率因数的计算提供了方便;

d. 尽管本文只针对广义瞬时功率理论进行分析, 但得出的结论却同样适用于其他理论(比如基于

周期函数空间的通用功率理论等)。

参考文献:

- [1] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 1A-20(3): 625-630.
- [2] 王茂海, 刘会金. 通用瞬时功率定义及广义谐波理论[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 68-73.
WANG Maohai, LIU Huijin. A universal definition of instantaneous power and broad-sense harmonic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 68-73.
- [3] 王茂海, 刘会金. 通用瞬时功率理论的完善与负载性能评价指标的建立[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 81-84.
WANG Maohai, LIU Huijin. Perfecting of the universal instantaneous power theory and presentation of load performance index [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 81-84.
- [4] 王茂海, 孙元章. 三相电路中功率现象的解释及无功功率的分类[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 64-66.
WANG Maohai, SUN Yuanzhang. Analysis of power phenomenon and classification of reactive power in three-phase circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 64-66.
- [5] 王茂海, 刘会金. 非正弦及不对称电路中功率现象的探讨[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 93-96.
WANG Maohai, LIU Huijin. Approach of power phenomenon in non-sinusoidal circuit and asymmetrical circuit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 93-96.
- [6] PENG Fangzheng, LAI Jihsheng. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 293-297.
- [7] PENG Fangzheng, GEORGE W O J, DONALD J A. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(6): 1174-1181.
- [8] HERRERA R S, SALMERON P, VAZQUEZ J R, et al. Instantaneous reactive power theory to N wire systems[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Huelva, Spain: IEEE, 2007: 2457-2462.
- [9] HERRERA R S, SALMERON P, VAZQUEZ J R, et al. Generalized instantaneous reactive power theory in poly-phase power systems[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Huelva, Spain: IEEE, 2009: 293-297.
- [10] DAI Xianzhong, LIU Guohai, GRETSCH R. Generalized theory of instantaneous reactive quantity for multi-phase power system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 965-972.
- [11] 王勤, 戴先中. 非正弦不对称三相三线电路负载侧相电压的定义与测量[J]. 电工技术学报, 1997, 12(6): 55-59.
WANG Qin, DAI Xianzhong. The definition and measurement of load's phase voltages in non-sinusoidal unsymmetrical three-phase three-wire system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997, 12(6): 55-59.
- [12] 伏祥运, 王诗明, 董自胜. 基于周期函数空间的通用功率理论分析与改进[J]. 江西电力, 2008, 32(6): 20-26.
FU Xiangyun, WANG Shiming, DONG Zisheng. Analysis and

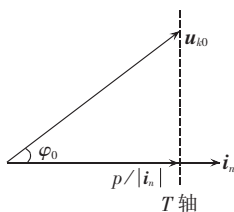


图 5 选择点 x_0 作为参考点时的电压、电流关系

Fig.5 Relationship between voltage and current with point x_0 as reference point

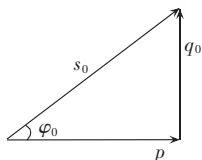


图 6 选择点 x_0 作为参考点时的功率关系

Fig.6 Power relationship with point x_0 as reference point

- improvement of general power theory based on periodic function space[J]. Jiangxi Electric Power, 2008, 32(6): 20-26.
- [13] JEON S J. Unification and evaluation of the instantaneous reactive power theories [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1502-1510.
- [14] 胡文彪, 马伟明. 基于周期函数空间的通用功率定义[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9): 64-70.
- HU Wenbiao, MA Weiming. A universal definition of power based on periodic function space[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 64-70.
- [15] 付志红, 熊学海, 侯兴哲, 等. Fryze 时域无功与通用无功定义的一致性条件分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 59-65.
- FU Zhihong, XIONG Xuehai, HOU Xingzhe, et al. Analysis of coherence condition for Fryze time-domain reactive power definition and universal reactive power definition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 59-65.
- [16] 梁玉娟. 关于电势参考点选择的几个问题[J]. 河池师专学报, 1999, 19(2): 43-45.
- LIANG Yujuan. Some problem on the selection of potential reference point[J]. Journal of Hechi Teachers College, 1999, 19(2): 43-45.
- [17] 韦群, 张家政. 零电势参考点的选择[J]. 武汉师范学院学报, 1983(1): 133-139.
- WEI Qun, ZHANG Jiazheng. Selection of zero potential reference point[J]. Journal of Wuhan Teachers College, 1983(1): 133-139.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968—),男,甘肃民勤人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统电能质量分析与控制、电机设计及其控制系统、电力电子技术及其应用等(E-mail: tianmingxing@mail.lzjt.cn);

王江彬(1990—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,研究方向为多端电路功率理论;

赵远鑫(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为混合补偿系统容量计算及优化。

Reference point selection method in definition of power theory

TIAN Mingxing^{1,2}, WANG Jiangbin^{1,2}, ZHAO Yuanxin^{1,2}

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Engineering Laboratory for Rail Transit Electrical Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The problem of reference point selection in the definition of power theory is very basic but has not got a uniform solution. Firstly, the constraint condition of reference point selection is determined according to the demand of KCL(Kirchhoff's Current Law) which must be met by the terminal currents of a multi-terminal circuit. Secondly, the uniqueness of the reference point selection under the constraint condition is proved, and the unique reference point satisfying the constraint condition is selected from many alternative reference points. Finally, the specific method of reference point selection is given, and the reference point selection method is simplified from the perspective of engineering application. Taking the generalized instantaneous power theory as an example, the proposed method is further explained and its compatibility is discussed, and the current decomposition method and the power definition method employed by the generalized instantaneous power theory are modified to make the power of a specific circuit be a unique determined value.

Key words: power theory; multi-terminal circuit; reference point; constraint condition

(上接第 58 页 continued from page 58)

A novel power control strategy for MMC-RPC

SONG Pinggang, ZHOU Zhenbang, DONG Hui

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to harness the power quality problems of traction power supply system comprehensively, the power relationship between the left and right power supply arm of a V/v transformer is analyzed. The reactive power, harmonic, negative sequence and other power quality problems are comprehensively harnessed by means of active power balance, reactive power compensation, harmonic power separation and so on. Meanwhile, the differential flatness control theory is introduced to the direct power control for MMC-RPC (Railway Power Conditioner based Modular Multilevel Converter). The active power and reactive power of the power supply arm are selected as the output of the system, in which the differential flatness condition can be satisfied according to the differential flatness theory. Consequently, the whole MMC-RPC system is a differential flatness system. The control system consists of two parts, feed forward control and error feedback control. The feed forward control provides the main control variables, while the feedback control corrects the error. The simulation system considering different conditions is built on MATLAB/Simulink. Simulative results verify the effectiveness and superiority of the proposed control strategy compared with other control methods.

Key words: modular multilevel converter; railway power conditioner; differential flatness theory; power control; proportional integral controller