

论变压器理论分析中的矛盾及对策

李 自 良

(电气工程系)

摘 要

根据法拉第、楞次、麦克斯韦理论,具体研究了变压器的基本原理和定向方法。统计分析了变压器理论及应用中长期存在的矛盾问题。对于各种定向方法进行了鉴别,并建议取消负号和采用实际定向法。

关键词:变压器;定向;实际定向法

1 引 言

十九世纪以来的二百年间,通过大量的创造性工作,电工技术取得显著进步。^[9,10]作为二次能源,电能在今后也是无可替代的。因此,变压器理论和技术十分重要,有些问题还需要得到解决。其中,变压器的定向方法就是一个重要的和值得探讨的理论及实用问题。在国外,对这个问题曾经作过学术研究,而且有时讨论热烈;在国内,则未见对此发表见解。时至今日,在某些中学和大学教科书以及产品说明书中,还在使用双向箭头。为此,作者对变压器理论分析中各交变物理量参考方向(假定正方向)的标定问题特作如下论述,以供参考。

2 理论基础

2.1 法拉第理论

法拉第(Faraday)电磁感应定律^[4,5,13]——不论任何原因,当穿过导体回路所包围面积中的磁通发生变化时,则在该回路中产生感应电势。它在数值上等于回路磁链 ψ 对时间 t 的变化率,即

$$e = \frac{d\psi}{dt} \quad (1)$$

法拉第的实验是用闭合导体回路做的,他把感应电势的产生解释为导体切割磁力线的结果。在磁场中运动的导体内,之所以产生感应电势,是由于运动电荷受到洛仑兹(Lorentz)力的作用,从而形成电荷的分离现象。这样,由金属的电子理论便能说明电磁感应现象的微观

本文于1992年6月5日收到

本质。

2.2 楞次理论

楞次 (ЛЕНЦ) 定律^[4,5,13]——闭合回路中, 感应电势及其感应电流具有确定的方向, 以便阻止回路中原磁通的变化, 并在回路中产生力图保持原磁通不变的电效应和机械效应。

实质上, 楞次定律 (法则) 是电磁惯性定律。在自然界中, 也有类似的其他定律, 如经典力学中的牛顿第一定律等。

导体切割磁力线 (即导体和磁场间有相对运动) 时的电磁感应现象如图 1 (a) 所示。按左手螺旋定则, 确定感应电势 e 和感应电流 i 的方向如图。电流 i 产生的磁感应强度 $\vec{B}$ 同外磁场的 $\vec{B}$ 反向, 从而抵消和补偿了回路中磁通的增加, 这就是电效应。由安培定律, 载流导体 ab 所受到的磁场力 $\vec{F}$ 与导体运动速度 $\vec{v}$ 反向, 故 $\vec{F}$ 是制动力, 从而试图阻止回路线性尺寸的变化 (或回路的转动) 以及磁通的变化, 这就是机械效应。

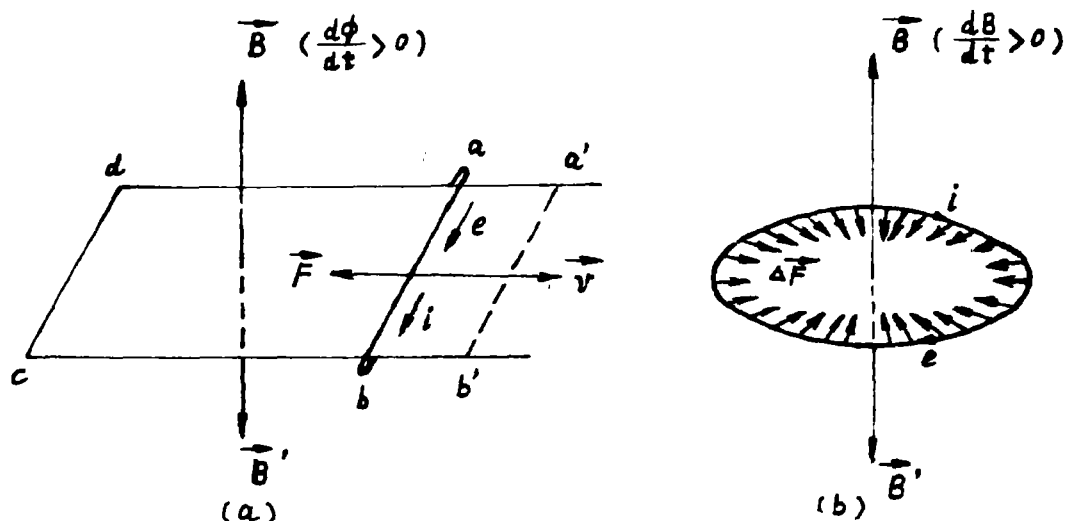


图1 楞次定律的图形表示

导体回路保持静止不动, 而使回路中的磁通发生变化时的电磁感应现象如图 1 (b) 所示。这相当于在变压器中发生的电磁物理过程。由楞次定律, 确定感应电势 e 和感应电流 i 的正方向如图。电流 i 产生的 $\vec{B}$ 同外磁场的 $\vec{B}$ 反向, 即表现为电效应。同时, 电流 i 受到磁场作用力 $\vec{F} = \sum \Delta \vec{F}$, 即表现为机械效应。在实际的变压器中, 该磁场力相当于在纵向漏磁场中绕组所受到的辐向电力。

在电磁感应现象中, 也可能上述两种情况兼而有之。如果只考虑其中一种情况, 则式 (1) 中的全导数应改为偏导数。

由上述可知, 从实际物理过程出发, 在 e 、 i 的正方向与 $\vec{B}$ 之间, 我们采用了左手螺旋定则。但是, 多年来形成的传统习惯却是采用右手螺旋定则, 从而在一系列的公式、电路图以及相量图中出现了许多负号, 并引起弊端。不难看出, 采用负号并不是法拉第定律和楞次定律所固有的, 这个负号充其量只能被理解为楞次定律的数学表示。追溯历史, 十九世纪末, 在

德国学者亥姆霍兹 (Helmholtz) 的支持下, 聂曼首先引入了这个负号, 随后便引起了争议。

2.3 麦克斯韦理论

麦克斯韦 (J. C. Maxwell) 指出, 磁感应强度对时间的变化率 $\partial \vec{B} / \partial t$ 不为零时, 则磁场所在空间就产生涡旋电场, 从而形成交变 (时变) 的电磁场。在涡旋电场的作用下, 导体内的自由电子也要发生运动而产生感应电势。

关于涡旋电场的数学描述, 可以表示为麦克斯韦第二方程的积分形式

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

和微分形式

$$\text{rot} \vec{E} = \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

由向量磁位 $\vec{A}$ 的定义, 可知

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

由式 (3) 和 (4), 得涡旋电场强度

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (5)$$

亥姆霍兹定理指出, 任何向量场通常可认为是无旋场与无源场之和, 且可分别根据标量位函数的梯度和向量位函数的旋度求得。交变电磁场中, 电场强度^[6]

$$\vec{E} = \vec{E}^{\text{pot}} + \vec{E}^{\text{ma}} \quad (6)$$

式中 $\vec{E}^{\text{pot}}$ ——电场强度的电位分量, 其值为:

$$\vec{E}^{\text{pot}} = - \text{grad} \varphi$$

$\vec{E}^{\text{ma}}$ ——由变化的磁场产生的电场强度的涡旋 (感应) 分量, 其值为:

$$\vec{E}^{\text{ma}} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

这时, 在电压作用下, 从 a 到 b 的区间上, 对 $\vec{E}^{\text{pot}}$ 的曲线积分

$$u_{ab} = \int_a^b \vec{E}^{\text{pot}} \cdot d\vec{l} \quad (7)$$

而在感应电势作用下, 从 c 到 d 的区间上, 线积分

$$e_{cd} = \int_c^d \vec{E}^{\text{ma}} \cdot d\vec{l} \quad (8)$$

由电场强度的上述定义可知, $\vec{E}^{\text{pot}}$ 应与 $\text{grad} \varphi$ 反向, 而 $\vec{E}^{\text{ma}}$ 应与 $\partial \vec{A} / \partial t$ 反向。可是, 在传统上所形成的作法是只取 $\vec{E}^{\text{pot}}$ 与 $\text{grad} \varphi$ 反向。与此同时, 作为 $\vec{E}^{\text{ma}}$ 的正方向, 却将其选为 $\vec{A}$ 的方向, 而在该电场强度分量以及相应的感应电势表达式中, 负号就这样被固定下来了。这时, 依据右手螺旋方向, 取感应电势 $e^{\text{ma}} = -d\varphi/dt$ 。作者反对该种作法。

显然, 跟标定 $\vec{E}^{\text{pot}}$ 的正方向类似, $\vec{E}^{\text{ma}}$ 理应与 $\partial \vec{A} / \partial t$ 反向。这时, 依据左手螺旋方向, 得 $e^{\text{ma}} = +d\varphi/dt$ 。作者主张这种作法。

综上所述, 电场强度的两个分量 $\vec{E}^{\text{pot}}$ 和 $\vec{E}^{\text{ma}}$ 均应按相同的规则进行数学描述。1985 年 9 月, 在莫斯科举行的第三次理论电工国际讨论会上, A. B. 聂图什尔教授在他的报告中强调上述

观点后^[4],引起相当大的反应,并得到众多学者名流的赞同。

这里的结论与我们对法拉第定律和楞次定律的前述分析结果相符。在变压器理论分析中,我们把这种定向方法称为实际定向法。1981年以来,作者在发表的论著中,独立地采用了实际定向法。^[1,2]1992年10月,在上海同济大学举行的全国电路理论及应用第三届学术年会上,作者在宣读的论文中阐述与聂图什尔类似的观点后^[3],得到与会学者的肯定。

3 变压器基本原理

实际变压器的绕组具有漏磁通,而且铁心材料具有变化的磁导率。因此,在广义上,变压器相当于部分耦合的非线性铁心线圈。这时,如果采用叠加原理和考虑自感 L 及互感 M ,那将比较困难。通常采用激磁电感 L_m 和绕组漏感 L_s (或激磁电抗 x_m 和漏抗 x_s),从而能够比较容易地研究变压器^[8]。采用实际定向法时,得变压器的T形等值电路,如图2所示。

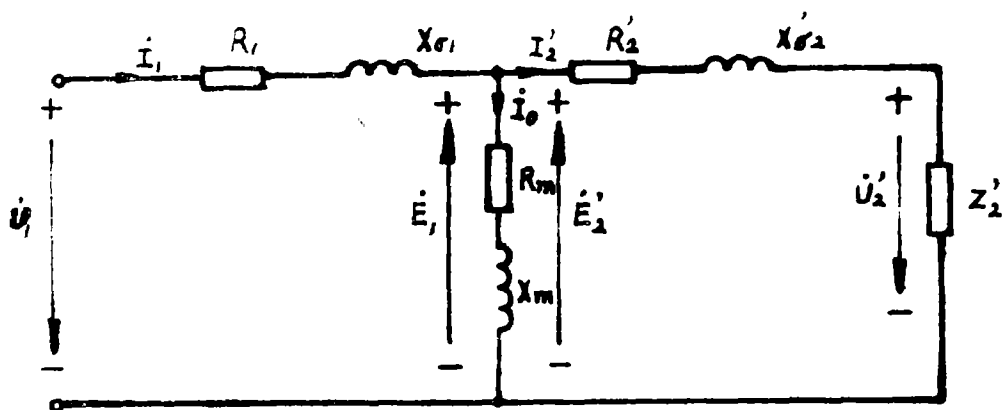


图2 变压器的等值电路

变压器的回路方程组

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 R_1 + j I_1 x_{s1} + E_1 \\ E_2 &= I_2 R_2 + j I_2 x'_{s2} + U_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

辅助方程式

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= E_2 = I_0 (R_m + j x_m) = (I_1 - I_2) (R_m + j x_m) \\ U_2 &= I_2 Z_2 = I_2 (R' + j x') \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),得回路方程组

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 R_1 + j I_1 x_{\sigma 1} + (I_1 - I_2)(R_m + j x_m) \\ (I_1 - I_2)(R_m + j x_m) &= I_2' R_2' + j I_2' x_{\sigma 2} + I_2(R' + j x') \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以主(铁心)磁通最大值的复量形式 ϕ_m 为参考相量时, 变压器的相量图如图 3 所示。由图中可见, 跟传统习惯不同, 各相量主要分布在复平面的第一象限, 既无相量反转 180° 的现象发生, 也没有出现负号, 从而显示了实际定向法的优越性。

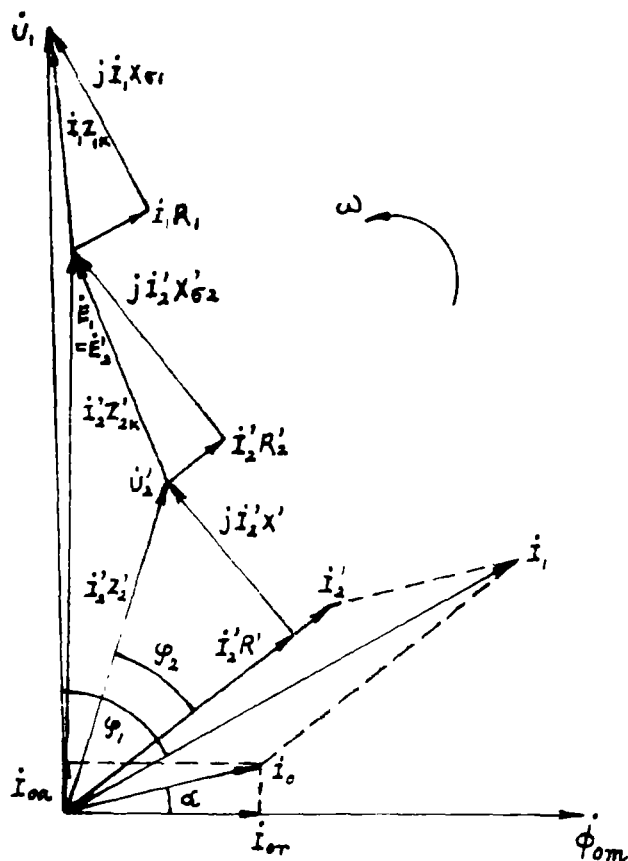


图 3 变压器的相量图 (电阻电感性负载, $\varphi_2 > 0$, $x > 0$)

4 定向方法甄别

4.1 变压器定向方案

当前世界电工界流传的变压器主要定向方案如图 4 所示^[6]。

方案 a 传统方案, 即惯用定向法, 亦即经典的相量标志法, 它是某些教科书和科技文献所习惯采用的定向方法, 影响广泛。

方案 b 跟方案 a 相比较, 该方案只是改变次边电压及电流的正方向。这时, 次边电流不

是由次边电势产生的, 而是由该电势的负值产生的。

方案c 实际定向法, 即实际的相量标志法, 它是国外某些学者以及本文作者主张采用的定向方法, 已如上述。

方案d 这是一种对称式的定向法。当预先不可能判断出变压器中的电能传输方向, 特别在分析多绕组变压器时, 不便于将绕组区分为原边和次边, 而宜于同样和平等地看待所有绕组。这时, 变压器方程式对称于标号1和2。

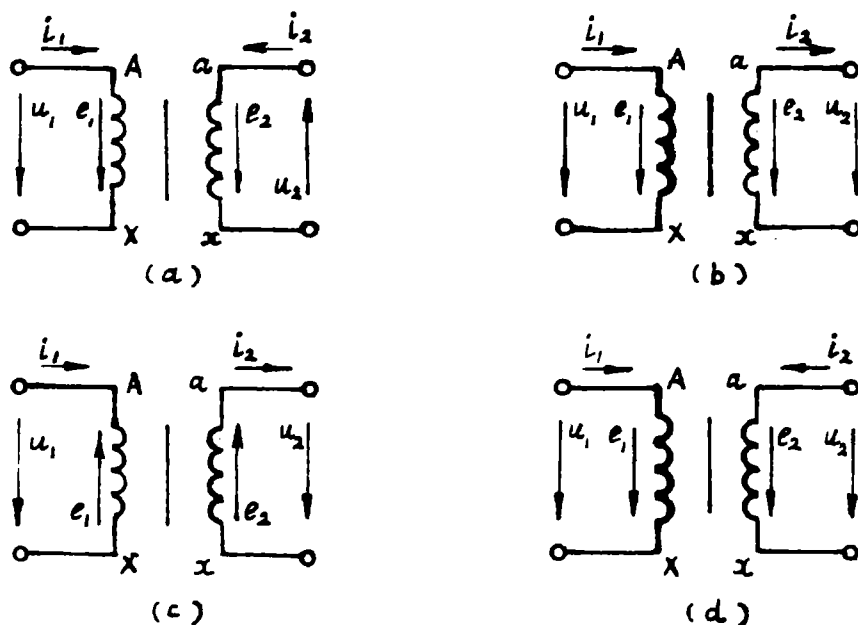


图4 变压器的定向方案

4.2 变压器定向标准

每个方案都能正确地写出变压器方程式, 并得出描述变压器中所发生的物理过程的正确结果。但是, 所得到的这些描述只能在一定程度上符合要求。比较变压器的定向方案时, 可采用如下标准:

- (1) 在一次绕组(受电器)中, 电势与电流反向。在受电器中, 感应电势为反电势。
- (2) 在二次绕组(电源)中, 电势与电流同向。在电源中, 感应电势为正电势。
- (3) 与电流互感器的理论分析相符。当原边电流由对应端(同名端)流入时, 则次边电流由对应端流出, 即原边和次边电流(输入和输出电流)的参考方向彼此呼应, 互为因果。这时, 所有绕组的磁势之差近于零, 而不是磁势之和近于零。
- (4) 与电压互感器的理论分析相符。当原边电压由端子A指向x时, 则次边电压由端子a指向X, 即原边和次边电压(输入和输出电压)的参考极性一致, 亦即减极性。
- (5) 与三相变压器和自耦变压器的理论分析相符, 亦与电力网的运行状态分析及能流方向相符。既要求原边和次边电压的参考极性一致, 也要求原边和次边电流的参考方向彼此呼应。这时, $w_1 i_1 = w_2 i_2$ 和 $U_1/w_1 = U_2/w_2$ 是三相变压器联接组的理论基础。

(6) 绕组和方程式对称。

4. 3 定向方案比选

将六条标准和四种方案组成标准矩阵, 如表 1 所示。其中, 达到一条标准者用 1 表示, 未达到标准者用 0 表示。同时达到标准 3 和 4 时, 方能达到标准 5。用标准 5 衡量方案 d 时, 可知只满足电压条件, 但不满足电流条件, 所以依然处于零状态。在文献〔6〕中, 该元素不等于 0, 而被取为 1, 作者认为有误。

标 准 矩 阵

表 1

方 案	达 到 标 准 的 情 况					
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
a	0	1	0	0	0	0
b	0	0	1	1	1	0
c	1	1	1	1	1	0
d	0	1	0	1	0	1

经过比较, 会倾向于采用方案 c, 它能达到五条标准 (行元素之和), 成为最佳方案。在某些文献中, 多次讨论和赞美方案 c。传统方案 a 最不可取, 这是因为在分析三相变压器及其联接组、自耦变压器、含有变压器的电力网运行状态、互感器、脉冲变压器以及磁放大器时, 这种定向方法表现出不切实际的致命弱点, 并引起各种弊端与矛盾^[3]。

4. 4 变压器定向状况

由于存在多种定向方案, 又不加以区别, 所以使教学用书的内容变得极其繁杂, 并在教学过程中反应不良。如同一本书中, 采用不止一种定向法; 同时出版和使用的两本书中, 各自采用不同的定向法。作者对这种状况进行了初步统计, 如表 2 所示。表中, 1 表示有, 0 表示无。在有关电工类的书籍中, 有时在建立变压器方程式时, 避免使用绕组感应电势的概念, 亦即电势的概念被完全取消了。这时, 第一和第二条标准失去意义, 而方案 b 和 c 合二为一。参考文献〔21〕中, 根据惯用定向法, 采用感应电势的概念。但在修订后的〔22〕中, 反而回避了感应电势的概念, 并代之以“感应电压”。因此, 在变压器的定向方案上, 这本书处于零状态。此外, 在〔21〕的图 1—5—2 和〔22〕的图 1—7—1 中, 两个有向闭合环的物理意义也不明确。

在教学用书中, 还出现了导致错误结果的上述方案组合^[3]。例如, 在同一课题下, 电磁感应定律、电路图及等值电路、变压器方程式、相量图却分别按不同的定向方案给出。至于为什么方案 c 没有推广使用, 而方案 a 却一直延用至今, 除上述关于电磁感应定律和电场强度感应分量在数学描述上的历史性误会外, 还有一个原因就是顽固的保守性。多年从事电工和电机教学的读者用惯了方案 a, 但却不知道惯用定向法在实用中的弱点和弊端^[3], 因而不以为然。长期担任专业教学和技术工作的读者不会感受不到方案 a 的严重问题, 然而尚未明确和自觉地提出实际可行的彻底解决方略。

定向方法一览表

表2

参 考 文 献	惯 用 定 向 法	实际定向法	双 向 箭 头
7	1	0	1
8	1	1	1
9	1	0	1
10	1	0	1
11	1	0	0
12	1	1	0
13	1	0	0
14	1	0	0
15	1	0	0
16	1	1	0
17	1	0	0
18	1	0	1
19	1	1	0
20	1	1	0
21	1	0	0
22	0	0	0
23	1	1	0

5 结 语

(1) 目前变压器定向状况同当年多种单位制并行使用中的混乱局面相仿佛。各学科及相关课程中,统一推行国际单位制(SI)后,那种混乱局面便随之消失了。同理,在变压器以及异步电动机的理论研究中,对于假定正方向的选择方法,应及时进行整顿。这是多门电类课程共同存在的问题。

(2) 不能只局限于在电工原理和电机学等技术基础课程中的讲授习惯,也要考虑传授知识的科学性与合理性,还应考虑在后续的专业课程中,特别是学生毕业后在实际工作中的需要与方便。

(3) 变压器的定向方法已经超出了教学工作及其讲授方法的范畴,从而成为电工学术领域中的一个重要理论和实用问题。确定最佳定向方案后,能够消除电磁感应理论在变压器应

用中的分歧与矛盾。主要的分歧就是负号的取舍问题。首先是不切实际地采用负号,然后又用负负得正的原则加以矫正,这种多余的作法实在没有意思。用科学性和系统性处理方法(Системный подход)取代不协调性后,便于对变压器问题进行工程技术分析。

(4)作为消除分歧与矛盾的对策,作者推荐在一般的电机和电力工程中采用实际定向法。跟惯用定向法相比较,该方法具有令人信服的优越性。

参 考 文 献

- [1] 李自良,陈薇. 自耦变压器的等值电路·武汉水利电力学院学报, 1981, 4: 119—127
- [2] 李自良,陈薇. 自耦变压器等值电路的应用. 变压器, 1991; 12: 2—8
- [3] 李自良. 见: 中国电机工程学会理论电工专业委员会电路理论及应用分专业委员会, IEEE 北京分部. 全国电路理论及应用第三届年会论文集. 变压器定向理论研究. 上海: 同济大学出版社, 1992: 155—168
- [4] 高等工业学校物理学编写组. 物理学(第二册). 北京: 高等教育出版社, 1956: 177—214
- [5] 冯慈璋主编. 电磁场. 北京: 人民教育出版社, 1979: 293—309, 545—548
- [6] А. В. Нетушил, О системном подходе в преподавании электрических дисциплин, Электричество, 1986, No. 5, 43—47
- [7] К. А. Круг, Основы электротехники, М: ОНТИ, 1936, 543—552
- [8] Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров, Теоретические основы электротехники, Ч. I, М.: Госэнергоиздат, 1954, 241—254
- [9] Г. Н. Петров, электрические машины, Ч. I, М.: Госэнергоиздат, 1956, 41—71
- [10] А. В. Иванов—Смоленский, Электрические машины, М.: Энергия, 1980, 21—22, 33—58
- [11] Теоретические основы электротехники, Т. I, под ред. П. А. Ионкина, М.: Высшая школа, 1976, 69—75
- [12] Г. В. 泽维凯, П. А. 伊昂金著. 周孔章等译. 电工基础(第一册). 北京: 高等教育出版社, 1959: 124—145
- [13] Л. А. 别索诺夫著, 陈伟鑫等译. 电工理论基础(上、下册). 北京: 人民教育出版社, 上册—1982: 52—70; 下册—1986: 145—150
- [14] 俞大光编. 电工基础(中册). 北京: 人民教育出版社, 1959: 143—156
- [15] 章名涛主编. 电机学(上册). 北京: 人民教育出版社, 1964: 22—44
- [16] 西安交通大学电工原理教研室编. 电工基础(上册). 西安交通大学, 1973: 179—300
- [17] 吴大榕. 电机学(上册). 北京: 水利电力出版社, 1979: 156—167
- [18] 许实章主编. 电机学(上册). 北京: 机械工业出版社, 1980: 154—166
- [19] 邱关源主编. 电路. 北京: 人民教育出版社, 1981: 222—242
- [20] 邱关源主编. 电路(修订本, 上册). 北京: 高等教育出版社, 1989: 257—283

- [21] 江泽佳主编. 电路原理 (上册). 北京: 人民教育出版社, 1982: 14—20, 346—356
- [22] 江泽佳主编. 电路原理 (修订本, 上册). 北京: 高等教育出版社, 1987: 19—24, 270—273
- [23] 周孔章编. 电路原理 (上册). 北京: 高等教育出版社, 1984: 312—344

On the Contradiction and the Countermeasure of the Transformer Theory Analysis

Li Ziliang

ABSTRACT

According to Faraday, Lenz and Maxwell theory, the basic principle and the directional method of transformers have been concretely studied. This paper statistically analyses the contradiction that long exist in the transformer theory and its use. As for all kinds of the directional method, discrimination is carried on. We propose to cancel the negative sign and to adopt the real directional method.

Key words: transformer; direction; real directional