



理想变压器中的相位问题研究

——一道全国卷高考题引发的问题讨论

张红明

(北京师范大学附中 北京 100052)

周宗波

(武汉武钢三中 湖北 武汉 420100)

(收稿日期:2017-06-15)

摘要:2015年全国课标 I 卷 16 题考完之后,在相当多的中学物理教师中引发了热议,并对该题的科学性问题提出了质疑.该问题涉及到高中物理教学中的一个典型问题——理想变压器的远距离输电问题,对该问题的澄清必然有利于高中物理日常教学.本文从还原物理模型入手,对该问题作了全面深入的分析,对解决教师们的疑惑将会有很大的帮助.

关键词:理想变压器 相位 远距离输电

1 问题引入

变压器问题的考查连续出现在全国高考课标卷理综试题中,2014,2015,2016 年均有考查.通过理想变压器的副线圈串接二极管,通过理想变压器的原线圈串接电阻等,来考查学生的灵活应变能力、创新能力和探究能力.下面给出 2015 年全国课标 I 卷理综物理试题.

【例 1】(2015 高考全国课标 I 卷第 16 题)一理想变压器的原、副线圈的匝数比为 $3:1$,在原、副线圈的回路中分别接有阻值相同的电阻,原线圈一侧接在电压为 220 V 的正弦交流电源上,如图 1 所示.设副线圈回路中电阻两端的电压为 U ,原、副线圈回路中电阻消耗的功率的比值为 k ,则

A. $U = 66\text{ V}, k = \frac{1}{9}$ B. $U = 22\text{ V}, k = \frac{1}{9}$

C. $U = 66\text{ V}, k = \frac{1}{3}$ D. $U = 22\text{ V}, k = \frac{1}{3}$

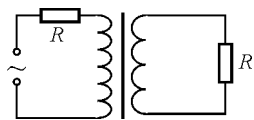


图 1 题图

下面对该题展开分析.

如图 2 所示,设原、副线圈中的电流有效值分别为 I_1 和 I_2 ,根据理想变压器的电流比为线圈匝数反

比有 $I_1 : I_2 = 1 : 3$,再根据功率公式 $P = I^2 R$,故原、副线圈回路中电阻消耗的功率比值为 $k = \frac{1}{9}$. 根据副线圈回路中电阻两端的电压为 U ,则原线圈两端电压为 $3U$,原线圈电阻 R 上的电压为 $\frac{U}{3}$,再根据原线圈电源电压为 220 V ,列式为 $3U + \frac{U}{3} = 220\text{ V}$,可解得 $U = 66\text{ V}$.

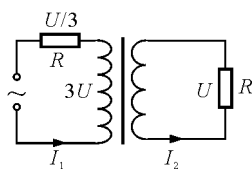


图 2 例 1 分析

对于以上的分析,教师们可能存在两种认识:一种观点认为这种解法合情合理,也就没有引发进一步的思考;另一种观点认为这种解法存在严重的科学性问题,线圈两端的电压与电流之间存在相位差,电压相位超前电流相位 $\frac{\pi}{2}$,因此电源电压并不等于电阻两端电压和变压器原线圈两端电压直接相加,即上述分析中的列式 $3U + \frac{U}{3} = 220\text{ V}$ 是错误的.持第二种观点的教师认为这是一道错题,是高考出题中的失误.

2015 年这道高考题在中学物理教师中引起了

广泛的热议,两种观点激烈碰撞,更为令人困惑的是在接下来的2016年高考全国卷中又出现了类似的变压器问题.这到底是怎么回事?

2 问题研究

一种直觉,认为这道题有科学性错误的观点是有问题的.该题的原线圈中串联了电阻 R ,表面看起来是理想变压器的一种变式,其实它应该是一种典型的物理问题.请看远距离输电,其示意图如图3所示.

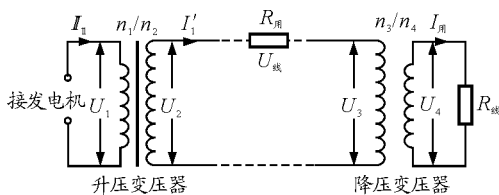


图3 远距离输电示意图

在远距离输电问题中,如果去掉升压变压器,直接把升压变压器的输出电压看作是电源,那么远距离输电问题就变成上述的高考题,它们在本质上完全一样.对于远距离输电,我们经常用到电压关系 $U_2 = U_{\text{线}} + U_3$,对这个关系我们觉得天经地义,丝毫没有怀疑它的正确性,根本没有人提出电阻两端电压与线圈两端电压存在相位差问题.

在上述高考题中,电阻两端电压加上线圈两端电压就是电路输入的总电压,其正确性应该是显然的.这个正确性是建立在线圈两端电压与电阻两端电压是同相位的,下面对其正确性进行深入地研究.

理想变压器是以互感现象为基础的电磁装置,它的原理性结构如图4所示.

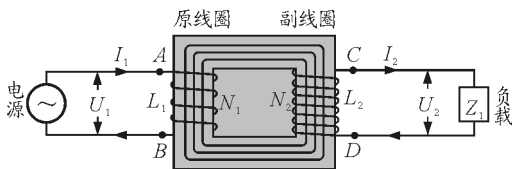


图4 理想变压器原理性结构

理想变压器是绕在同一个铁心上的两个线圈.在交流电源的作用下,原线圈内产生交变电流,从而在铁心内激发交变的磁通量.交变的磁通量又在副线圈内产生感应电动势和感应电流,它反过来通过互感磁通又影响到原线圈.这便是变压器工作时的基本过程.理想变压器应该满足以下几个条件:

(1) 没有漏磁,即通过两个线圈中每匝的磁通量都一样;

(2) 两线圈中没有电阻,从而没有铜损(即忽略线圈导线中的焦耳损耗);

(3) 铁心中没有铁损(即忽略铁心中的磁滞损耗和涡流损耗);

(4) 原、副线圈中的感抗趋于无穷大,从而空载电流趋于零.

2.1 理想变压器的电压变比公式

首先,为了确定正负号,先得规定原、副线圈的回绕方向.两线圈回绕方向的选择如图4中箭头所示,应该注意到这样的选择使得它们在磁芯内产生的磁通量的方向是一致的,即都沿顺时针方向.

设原、副线圈的匝数分别为 N_1, N_2 ,通过磁芯任意横截面得到磁通量为 φ ,则通过原、副线圈的磁通匝链数分别为 ψ_1, ψ_2 ,则

$$\psi_1 = N_1 \varphi = L_1 I_1 + M_{21} I_2 \quad (1)$$

$$\psi_2 = N_2 \varphi = L_2 I_2 + M_{12} I_1 \quad (2)$$

式中 L_1, L_2, M_{21}, M_{12} 分别为原副线圈的自感系数和互感系数, I_1, I_2 分别为原副线圈中的电流.

根据法拉第电磁感应定律,两线圈中产生的感应电动势分别为

$$\varepsilon_{AB} = -\frac{d\psi_1}{dt} =$$

$$-j\omega N_1 \varphi = -j\omega L_1 I_1 - j\omega M_{21} I_2 \quad (3)$$

$$\varepsilon_{DC} = -\frac{d\psi_2}{dt} =$$

$$-j\omega N_2 \varphi = -j\omega L_2 I_2 - j\omega M_{12} I_1 \quad (4)$$

设变压器的原副线圈的电压分别为 u_1, u_2 ,则有

$$u_1 = u_{AB} = -\varepsilon_{AB} = j\omega N_1 \varphi = j\omega L_1 I_1 + j\omega M_{21} I_2 \quad (5)$$

$$u_2 = u_{CD} = \varepsilon_{DC} = -j\omega N_2 \varphi = -j\omega L_2 I_2 - j\omega M_{12} I_1 \quad (6)$$

以上两式相除得

$$\frac{u_1}{u_2} = -\frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

这便是理想变压器的电压变比公式,式中的符号表示 u_1 的相位与 u_2 相差 π .

2.2 理想变压器的电流变比公式

副线圈空载时,令式(1)中的 $I_2 = 0, I_1 = I_0$,立即得到空载电流(也称励磁电流)为

$$I_0 = \frac{u_1}{j\omega L_1} = \frac{N_1 \varphi}{L_1} \quad (8)$$

(下转第119页)

生都是有价值的. 美国学者 Paul Kirschner 和他的同事曾在《教育心理学家》杂志上发文, 明确指出: “尽管非指导性教学或者说指导最少化的教学方法非常流行, 而且看上去更吸引人. 问题在于这种教学方法忽视了构成人类认知结构的框架, 同时还忽视了已有的实证研究证据: 在过去半个世纪以来, 研究一直表明相比强调对学生认知过程进行引导的指导性教学方法, 指导性最少化的教学方法并不十分有效.” 美国另一学者 Louis Alfieri 和他的同事对过去 50 多年的研究结果进行梳理后得出类似的结论: “不给予指导的发现式教学, 基本不会促进学习.”

当然运用基于问题的学习模式, 学生无疑是教学的主体, 但也不能否定教师的作用, 教师在问题的设计、指导学生获得解决问题的方法以及调控学生

的合作学习等方面都起着重要的作用. 当学生遇到无法解答的问题或困难时教师应当及时给予提示和帮助, 充分发挥教师“导”的作用, 使学生顺利完成学习目标, 提升学习效率. 所以非指导的基于问题的学习对学习的促进效果是有限的, 而有引导的基于问题的学习, 才能够真正帮助学习者主动参与和建构知识.

参考文献

- 1 张彩霞. 同课异构——对比差异. 物理教学探讨, 2016, 34(8): 13 ~ 15
- 2 刘炳昇. 刘炳昇物理课程与实验教学研究文集. 南京: 南京师范大学出版社, 2016. 290 ~ 291
- 3 安妮塔·伍尔福克(美国). 教育心理学(第12版). 伍新春, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2017. 284 ~ 286

(上接第 111 页)

再看有负载电流的情形, 在式(1)中用 $j\omega L_1 I_0$ 代表左边的 u_1 , 移项后得

$$j\omega L_1 (I_1 - I_0) = -j\omega M_{21} I_2 \quad (9)$$

令 $I'_1 = I_1 - I_0$, 它代表由于存在负载电流 I_2 后原线圈增加的电流, 其作用是抵消 I_2 的磁通量. 于是有

$$\frac{I'_1}{I_1} = -\frac{M_{21}}{L_1} \quad (10)$$

可以证明, $\frac{M_{21}}{L_1} = \frac{N_2}{N_1}$, 且在理想变压器条件下 $I'_1 \approx I_1$, 于是有

$$\frac{I_1}{I_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

此式即为理想变压器的电流变比公式, 式中的符号表示 I_1 的相位与 I_2 相差 π .

3 问题分析

在上述题目中, 由于副线圈连接的是纯电阻元件, 因此副线圈中电压 u_2 与电流 I_2 是同相位的. 又由于原线圈中的 u_1 的相位与副线圈 u_2 相差 π , 原线圈中电流 I_1 的相位与副线圈中电流 I_2 相差 π , 所以原线圈的电压 u_1 与电流 I_1 是同相位的. 进一步知道, 原线圈中串联的电阻两端电压与线圈两端电压是同相位的, 所以它们的有效值可以直接相加等于

电路的输入电压. 至此, 上述问题就全面解决.

3 启示与反思

在交流电路中, 对于不计电阻的电感线圈或自感线圈, 其两端电压的相位超前电流相位 $\frac{\pi}{2}$, 这一点无疑是正确的. 但对于理想变压器中的线圈来说, 它是互感线圈, 其表现出来的性质不同于自感线圈, 如在上述讨论的理想变压器远距离输电问题中, 其两端电压与电流可以是同相位的. 之所以有这样的差异, 从能量的角度来看, 自感线圈是作为一种储能元件, 而互感线圈是传能元件, 其等效为一个耗能元件.

在中学物理远距离输电的教学中, 有时教给学生的是一些结论性的知识, 如高压输电电压等于输电线上的损耗电压加降压变压器的输入电压, 这其中的深层次的原因不要求学生知道, 但对教师来说应做到心中有数.

参考文献

- 1 人民教育出版社课程教材研究所. 普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-1. 北京: 人民教育出版社, 2014
- 2 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 普通物理教程·电磁学(第三版). 北京: 高等教育出版社, 2012
- 3 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学(下册). 北京: 高等教育出版社, 1985