

《电机学》课堂教学中的三平衡法

周腊吾 王旭红 刘东奇 王炜宇 关维德

长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙

摘要 | 《电机学》课程涵盖电路、机械、磁场以及导电材料、导磁材料、绝缘材料和电动力学等领域知识, 具有内容广泛、公式繁多、理论性强、紧密联系工程实践等特点, 是电气工程及其自动化专业的一门重要专业基础课。为了不断提高课程教学质量, 长沙理工大学《电机学》课程组教师运用类比教学方法, 提出了“源荷平衡、驱制平衡、入出平衡”的三平衡法, 对于同学们学习和掌握《电机学》中的基本平衡方程式起到了积极作用, 实践证明了这一方法的实用性和有效性。

关键词 | 电机学; 类比教学; 三平衡法

Copyright © 2024 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 前言

“电机学”是电气工程及其自动化专业的一门重要专业基础课, 是公共基础课与专业课之间的桥梁, 具有理论性强、知识点多、实践性强等特点, 涉及电、磁、热、力、场等多学科基础知识, 也是学生眼中“第一门天书”^[1-3]。如何做好“电机学”的理论和实验教学一直是本专业教师积极探索的重要课题, 特别是电机理论中的“平衡”问题^[4-6]。

由于教学时数的缩减, “电机学”课程作为同学们接触的第一门专业基础课, 其教学内容涉及直流电机、变压器、异步电机和同步电机等多个内容, 每一章节的重点及难点都很多, 导致这门课程的教学效果相对较差, 学生普遍感觉要学的内容太多太杂, 难度又大, 结合工程实践的力度又强^[7]。

“平衡”问题是众多课程里必须深入剖析的重点内容, 本文基于《电机学》课程内容中的平衡特点, 提出课堂教学中的“三平衡法”, 以形成条理清晰、概念明确、富含工程实际的教学方法, 进而深化知识结构, 实现“掷地有声”的教学效果。

2 三平衡法

2.1 源荷平衡

在电压平衡方程式的教学过程中，如何将直流电机、变压器、异步电机及同步电机的电源和负荷等区分开来是个非常关键的教学要点。辜承林等编写的教材《电机学》（第四版）^[8]中，是这样分别描述上述电机的电压平衡方程式的：

(1) 直流发电机

$$U = E + I_a R_a \quad (1)$$

式中， E 为感应电势； U 为端电压； I_a 为电枢电流； R_a 为电枢电阻。

(2) 直流电动机

$$U = E + I_a R_a \quad (2)$$

(3) 变压器

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma} \quad (3)$$

式中， \dot{E}_1 为一次侧感应电势； \dot{I}_1 为一次侧电流； $Z_{1\sigma}$ 为一次侧漏阻抗。

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_{2\sigma} \quad (4)$$

式中， \dot{E}_2 为二次侧感应电势； \dot{U}_2 为二次侧输出电压； \dot{I}_2 为二次侧电流； $Z_{2\sigma}$ 为二次侧漏电抗。

$$\dot{E}'_2 = \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_{2\sigma} \quad (5)$$

式中， \dot{E}'_2 为二次侧感应电势折算值； \dot{U}'_2 为二次侧输出电压折算值； \dot{I}'_2 为二次侧电流折算值； $Z'_{2\sigma}$ 为二次侧漏电抗折算值。

(4) 异步电动机

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma} \\ \dot{E}_2 = \dot{I}_1 (R_2 + jx_{2\sigma}) \\ \dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jx'_{2\sigma} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中，下标1代表定子；下标2代表转子；'代表折算值； s 为转差率。

(5) 同步发电机

对不计饱和的隐极同步发电机而言

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + j\dot{I} x_l \quad (7)$$

式中， \dot{E}_0 为每相绕组感应电势； \dot{U} 为端电压； \dot{I} 为每相电流； R_a 为每相电阻； x_l 为同步电抗。

对不计饱和的凸极同步发电机而言

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} R_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q \quad (8)$$

式中， \dot{I}_d 、 \dot{I}_q 分别为定子每相电流的直轴（d轴）和交轴（q轴）分量； x_d 、 x_q 分别为直轴同步电抗和交轴同步电抗。

(6) 同步电动机

对不计饱和的隐极同步电动机而言

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{I} R_a + j\dot{I} x_l \quad (9)$$

对不计饱和的凸极同步电动机而言

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + IR_a + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q \quad (10)$$

在电压平衡方程式中,对发电机而言,其“源”就是“绕组感应电势”,“荷”就是输出的“端电压”;对于电动机而言,其“源”就是输入电源电压,“荷”就是绕组感应电势,又将其称为“反电势”。电阻上的压降永远是“荷”。这样,将所有电机的电压平衡方程式统一为“源荷平衡”方程式。

无论是汤蕴璆《电机学》(第五版)^[9]、戈宝军等编著的《电机学》(第三版)^[10]、胡敏强等编著的《电机学》(第三版)^[11]、还是许实章主编的《电机学》上/下册(第二版)^[12]、顾绳谷等主编的《电机与拖动基础》(第四版)^[13]等教材中的均可以统一写成上述类似的“源荷平衡”方程式。

2.2 驱制平衡

对于旋转电机,要求其稳定运行,必须满足驱动转矩与制动转矩的平衡。

对直流发电机而言

$$T_1 = T_{em} + T_0 \quad (11)$$

式中, T_1 为原动机输入的机械转矩; T_{em} 为电磁转矩; T_0 为空载制动转矩。

对直流电动机而言

$$T_{em} = T_2 + T_0 \quad (12)$$

式中, T_2 为输出的机械转矩。

对异步电动机来说,其转矩平衡方程式同式(12)。

对同步发电机来说,其转矩平衡方程式同式(11)。

因此,无论是直流还是交流,只要是发电机,电磁转矩 T_{em} 总是制动性质的,其转矩平衡方程式为式(11);只要是电动机,电磁转矩 T_{em} 总是驱动性质的,其转矩平衡方程式为式(12)。这也是判断一台电机是发电机还是电动机的判据之一。

2.3 入出平衡

在任何时刻,电机或变压器的有功功率总是平衡的,其输入功率与输出功率总是相等的,简称“入出平衡”。

对于直流发电机而言

$$P_1 = P_2 + \sum p \quad (13)$$

式中, P_1 为输入功率; P_2 为输出功率; $\sum p$ 为总损耗。

$$\sum p = p_{Cua} + p_{Cuf} + p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} \quad (14)$$

式中, p_{Cua} 为电枢铜耗; p_{Cuf} 为励磁铜耗; p_{mec} 为机械损耗; p_{Fe} 为铁耗; p_{ad} 为附加损耗。

对于直流电动机、异步电动机、同步发电机、同步电动机而言,式(14)均成立,而变压器是转子静止时的电机,故仅没有与旋转相关的机械损耗,交流电机引入电磁功率,异步电动机入出平衡方程式有:

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu1} + p_{Fe} \quad (15)$$

式中, P_{em} 为电磁功率; p_{Cu1} 为定子铜耗。

$$P_{em} = P_{mec} + p_{Cu2} \quad (16)$$

式中, P_{mec} 为总机械功率; p_{Cu2} 为转子铜耗。

$$P_{mec} = P_2 + p_{mec} + p_{ad} \quad (17)$$

同步发电机入出平衡方程式有:

$$P_1 = P_{em} + p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} \quad (18)$$

$$P_{em} = P_2 + p_{Cu1} \quad (19)$$

同步电动机入出平衡方程式有:

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu1} \quad (20)$$

$$P_{em} = P_2 + p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} \quad (21)$$

2.4 “三平衡法” 案例

以双三相异步电动机为例, 可以形象地用等效电路 (图 1)、物理模型 (图 2) 以及功率流图 (图 3) 清晰地描述“三平衡”。

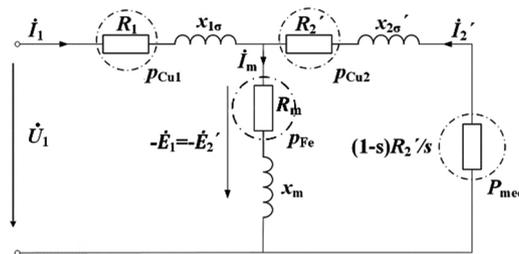


图 1 三相异步电动机等效电路

Figure 1 Equivalent circuit of three-phase asynchronous motor

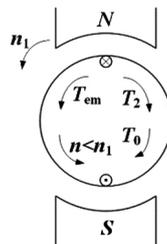


图 2 三相异步电动机物理模型

Figure 2 Physical model of three-phase asynchronous motor

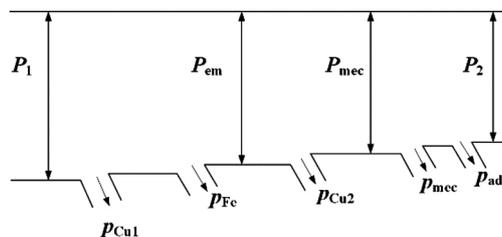


图 3 三相异步电动机功率流图

Figure 3 Power flow diagram of three-phase asynchronous motor

由图1的等效电路,可以写出“源荷平衡”方程式:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_{1\sigma} \\ \dot{E}_2' = \dot{I}_2' \left(\frac{R_2'}{s} + jx_{2\sigma}' \right) \end{cases} \quad (22)$$

也可以写出“入出平衡”方程式:

$$P_1 = P_{em} + P_{Cu1} + P_{Fe}$$

即式(15)。

由图2的物理模型可以写出“驱制平衡”方程式:

$$T_{em} = T_2 + T_0$$

即式(12)。

由图3可以写出三相异步电动机式(15)~式(17)的“入出平衡”方程式。

类似地,各类《电机学》或《电机与拖动基础》或《电力拖动基础》中的电压平衡、转矩平衡及功率平衡均可归纳为“源荷”“驱制”及“入出”这三种平衡,只要理解了这六个字的含义,所有电机或变压器的计算与分析就几乎不会出错。

3 “三平衡法”教学效果

长沙理工大学《电机学》课题组自2016年以来,采用“三平衡法”讲授电机和变压器的基本原理。从抽象到直观,从理论到现实,从书本到创新,同学们的掌握程度大幅提高,并实现了举一反三、熟练掌握和运用的目标,各种考试中类似题型的正确率由原先的不到50%提高到了89%。“三平衡法”教学的最显著特点是:

- (1) 直观:理论与模型相结合,使抽象理论变得生动具体,培养了学生的正确思维方法;
- (2) 易懂:教师板书等效电路、物理模型及流程图,同学们能马上写出这三组平衡方程式,区别对待各物理量,错误率降低了几乎50%。

4 结语

课堂教学的目的是引导同学们掌握基本理论和基础知识。如何将各种电机、变压器复杂的平衡归纳成有规可循的简单直观的表达式,并让学生尽快掌握,这是“三平衡”教学方法的核心。通过电压、转矩和功率这三类参数的物理平衡,可以掌握各类电机和变压器最重要的计算方法和性能分析,达到了开拓学生自学能力以及综合分析能力的目标,值得各高校推广应用,为我国高等教育贡献一份微薄的力量。

参考文献

- [1] 马明娜, 鲍晓华, 阚超豪, 等. 《电机学》教学案例库建设与案例教学法创新实践[J]. 中国电力教育, 2022(3): 46-47.
- [2] 谷爱昱, 郭艺伟, 洪俊杰, 等. 一流本科课程建设背景下《电机学》教学探索[J]. 中国电力教育, 2021(11): 80-81.

- [3] 宋战锋, 刘涛. 《电机学》教学方法改革探究 [J]. 中国电力教育, 2021 (1): 66-67.
- [4] 陈焯斐, 马宏忠. “电机学”中量化概念教学方法探讨 [J]. 教育教学论坛, 2018 (30): 192-193.
- [5] 朱志莹, 朱晨菲, 魏港庆, 等. 以变压器联结组为例浅析电机学课程教学改革 [J]. 科技视界, 2018 (12): 63-64.
- [6] 李书权, 聂宏展, 李娟, 等. 电机学课堂教学的改革与探索 [C]. 第四届全国高等学校电气工程及其自动化专业教学改革研讨会论文集, 2020 (1): 279-282.
- [7] 莫岳平, 靳宏, 张建华, 等. 《电机学》课程研究性教学的实践 [J]. 教育教学论坛, 2015 (39): 134-135.
- [8] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学 (第四版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
- [9] 汤蕴璆. 电机学 (第五版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [10] 戈宝军, 梁艳萍, 温嘉斌. 电机学 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [11] 胡敏强, 黄学良, 黄允凯, 等. 电机学 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [12] 许实章. 电机学 (第二版) 上、下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [13] 顾绳谷. 电机及拖动基础 (第四版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

Three-balance Method in Classroom Teaching of Electromechanics

Zhou Lawu Wang Xuhong Liu Dongqi Wang Weiyu Guan Weide

School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha

Abstract: The course of Electrical Engineering involves knowledge in the areas of electrical circuits, machinery, magnetic fields, conductive materials, magnetic materials, insulating materials, and electrodynamics, and it is an important basic course for the specialty of electrical engineering and its automation. It is characterized by extensive content, numerous formulas, strong theoretical foundation and close ties to engineering practice. In order to continuously improve the teaching quality of the course, the teaching group of the “Electrical Engineering” course at Changsha University of Science and Technology has employed analogy teaching methods and proposed the “Balance of source and load, balance of drive and balance of input and output” as the three-balance method. This method has proven to be practical and effective for students to study and master the basic balance equations in electromechanics.

Key words: Electromechanics; Analogy teaching; Three-balance method