



基于解析法的交流电机电枢绕组磁动势研究

王 昊

(曲阜师范大学 实验教学与设备管理中心, 日照 276826)

摘要: 交流电机电枢绕组的磁动势是电机学教学的重要内容。交流电机电枢绕组的磁动势既与时间有关, 又与空间有关, 比较抽象, 导致学生不容易理解。该文基于解析法对交流电机电枢绕组的磁动势进行分析, 并对交流电机定子绕组星形接法绕组缺相、定子绕组三角形接法电源供电及绕组断线缺相、交流电机能耗制动等几种特殊情况产生的磁动势进行分析。该方法有助于促进学生更好地理解交流电机的磁动势, 并且能够提高学生分析问题、解决问题的能力。实践表明, 该教学研究能够获得良好的教学效果。

关 键 词: 交流电机; 磁动势; 电枢绕组; 解析法

中图分类号: TM343

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20190166](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20190166)

Research on Magnetic Momentum of AC Motor Armature Winding Based on Analytical Method

WANG Hao

(Experimental Teaching and Equipment Management Center, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China)

Abstract: Armature winding magnetic motive force of AC machine is an essential part of Electric Machinery. The magnetic motive force of the armature winding of an AC motor is related to time and space. This concept is more abstract, which makes it difficult for students to understand. This paper analyzes the magnetic motive force of AC motor armature produced by some special conditions, such as star connection of AC motor stator winding lack-phase, power supply and winding disconnection of delta connection stator winding and AC motor dynamic braking. This method helps to promote students to better understand the magnetic motive force of AC motors, and can improve students' ability to analyze and solve problems. Practice shows that the teaching research can obtain good teaching effects.

Key words: AC machine; magnetic motive force; armature winding; analytical method

电机学、电机与拖动基础课程是电气自动化和自动化专业重要的专业基础课^[1-4]。如何提高这一类专业课程的教学质量, 成为一个重要的课题。很多高校的老师在教学过程中, 针对这一课题展开研究。如应用 MATLAB 仿真软件可以加强学生对电机原理及其运行方式的理解, 提高教学效果^[5-7]。电机学、电机与拖动基础课程的教学改革也是研究的热点^[8-12]。

交流电机电枢绕组的磁动势是电机学、电机与拖动基础课程教学中的重点和难点内容。交流电机电枢绕组的磁动势既与时间有关, 又与空间有关, 比较抽象, 导致学生不容易理解。交流绕

组的磁动势是后续学习交流电机的电磁关系的基础, 掌握该部分内容有助于学生理解交流电机的运行原理。

为便于学生理解和接受, 对交流电机电枢绕组磁动势的分析, 文献 [13] 采取以下次序讲解: 单个整距线圈的磁动势; 单、双层绕组的磁动势; 三相对称绕组流过三相对称电流时的基波磁动势、谐波磁动势; 任一脉振磁动势均可分解为两个幅值相等旋转方向相反的旋转磁动势; 不对称电流引起的磁动势。

为了帮助学生理解电机中的电磁场分布, 文献 [14] 提出利用电磁场有限元数值计算软件进行

收稿日期: 2019-04-24; 修回日期: 2019-12-03

基金项目: 曲阜师范大学实验教学改革研究项目(SJG201918)。

作者简介: 王昊(1980-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事实验室管理与建设方面的研究。

交流电机电磁场的数值计算, 进而分析交流电机旋转磁场的特点和规律。

以上文献均对交流电机电枢绕组的磁动势进行相关的教学探讨, 但是针对交流电机定子绕组由于故障导致的缺相和交流电机能耗制动等特殊情况下的磁动势合成问题没有进行系统的研究。

在电机与拖动基础课程教学中, 交流电机电枢绕组磁动势的分析是以单相绕组磁通势的分析为基础, 进一步分析两相和三相电枢绕组合成的磁动势。由于基波磁动势对电机的性能有决定性的影响, 因此本文将重点分析电枢绕组的基波磁动势。三相绕组合成磁动势的分析方法主要有3种, 即解析法、波形叠加法和空间矢量法。本文基于解析法对交流电机电枢绕组的磁动势进行分析的基础上, 进一步对交流电机定子绕组星形接法缺相、定子绕组三角形接法电源供电及绕组断线缺相、交流电机能耗制动等几种特殊情况产生的磁动势进行分析。笔者认为, 该教学探讨将有助于学生更好地理解交流电机电枢绕组磁动势的概念, 为后续交流电机原理的学习打好基础。

1 交流电机电枢绕组磁动势分析

交流电机电枢绕组磁动势的分析是在单相绕组磁通势的基础上, 进一步分析两相和三相电枢绕组合成的磁动势。

三相合成磁动势的解析法是将单相绕组的脉振磁动势分解为正转和反转磁动势, 正、反转磁动势分别求和, 得到总的正转和反转磁动势, 最后将正反转磁动势合成, 求得总的磁动势, 即三相合成磁动势。该方法同样适合两相电枢绕组磁动势的合成。

2 电机缺相磁动势分析

三相异步电机正常运行, 对称的三相绕组流过三相对称的电流, 形成圆形旋转磁场。但是, 在缺相故障情况下交流电机由于不能形成旋转磁场, 导致电机无法正常起动运行。基于解析法可以分析交流电机缺相时的磁动势, 有助于分析缺相故障对电机运行造成的影响, 加深学生对交流电机电枢绕组磁动势的理解。

2.1 定子绕组星形接法缺相磁动势分析

交流电机定子绕组星形接法, 电源电压断线

故障如图1所示。假设C相绕组电源断线, 则该相绕组电流为零。

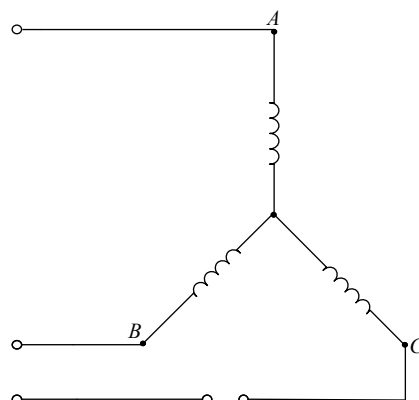


图1 定子星形绕组缺相磁动势分析

则在C相缺相的情况下, A、B两相的电流分别为:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_B = -\sqrt{2}I \cos \omega t \end{cases} \quad (1)$$

式中, I 为电流的有效值; ωt 为时间电角度。

将空间坐标原点取在A相绕组轴线处, 则A、B两相绕组在电机气隙圆周方向产生的基波磁动势分别为:

$$\begin{cases} f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha \\ f_{B1} = -F_{\phi 1} \cos \omega t \cos (\alpha - 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中, α 为空间电角度; $F_{\phi 1} = \frac{4}{\pi} \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{N k_{dp1}}{p} I$ 为单相绕组基波磁动势的幅值; $N = \frac{2pqN_y}{a}$ 为每相绕组串联的匝数; k_{dp1} 为基波绕组系数; p 为电机的极对数; q 为电机每相在每极下的槽数; N_y 为电机绕组的匝数。

则A、B两相绕组产生的合成基波磁动势为:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha, \omega t) &= f_{A1} + f_{B1} = \\ &= F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha - F_{\phi 1} \cos \omega t \cos (\alpha - 120^\circ) = \\ &= F_{\phi 1} \cos \omega t [\cos \alpha - \cos (\alpha - 120^\circ)] = \\ &= \sqrt{3} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos (\alpha + 30^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 交流电机定子绕组星形接法, 在C相绕组电源电压断线故障导致的缺相情况下, A、B两相绕组产生的合成基波磁动势为脉振磁动势。在电机启动时, 该磁动势无法产生启动转矩, 导致电机无法运行。绕组星形接法当某一相绕组内部断线时, 磁动势的分析与上述外部电源一相断线的情况完全相同。

2.2 定子三角形绕组缺相磁动势分析

交流电机定子绕组三角形接法, 电机的缺相

故障分为供电电源缺相和绕组内部断线缺相两种。定子三角形接法缺相故障如图 2 所示。

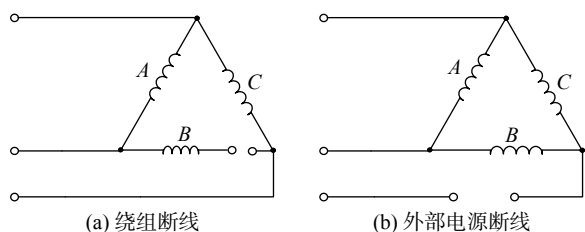


图 2 定子三角形绕组缺相磁动势分析

如图 2(a)所示, 定子绕组三角形接法, 假设 B 相绕组内部断线, 则该相绕组电流为零。此时, A、C 两相绕组的电流分别为:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_C = \sqrt{2}I \cos(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

将空间坐标原点取在 A 相绕组轴线处, 则 A、C 两相电流在电机气隙圆周方向产生的基波磁动势分别为:

$$\begin{cases} f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha \\ f_{C1} = F_{\phi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

则 A、C 两相绕组产生的合成基波磁动势为:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha, \omega t) &= f_{A1} + f_{C1} = \\ &F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha + F_{\phi 1} \cos(\omega t - 240^\circ) \cos(\alpha - 240^\circ) = \\ &F_{\phi 1} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos(\omega t + \alpha - 60^\circ) \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)可以看出, 交流电机定子绕组三角形接法, 在 B 相缺相的情况下, A、C 两相绕组产生的合成基波磁动势为椭圆形旋转磁动势。在该故障情况下, 电机的启动转矩减小, 甚至会导致电机无法正常启动。正常运行的交流电机如果发生绕组内部断线的缺相故障, 将会导致剩余两相绕组电流增加, 长时间运行后造成严重后果。

定子绕组三角形接法, 绕组外部供电电源断线故障如图 2(b)所示。此时, 相当于 B、C 相绕组串联后再与 A 相绕组并联, 外加的单相交流电。A、B、C 三相绕组能够正常工作, 但是失去了原有的对称性。

在该故障情况下, A、B、C 三相绕组中的电流分别为:

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I \cos \omega t \\ i_B = -\frac{\sqrt{2}}{2}I \cos \omega t \\ i_C = -\frac{\sqrt{2}}{2}I \cos \omega t \end{cases} \quad (7)$$

各相绕组的磁动势分别为:

$$\begin{cases} f_{A1} = F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha \\ f_{B1} = -\frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 120^\circ) \\ f_{C1} = -\frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 240^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

则三相绕组产生的合成基波磁动势为:

$$\begin{aligned} f_1(\alpha, \omega t) &= f_{A1} + f_{B1} + f_{C1} = \\ &F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha - \frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 120^\circ) - \\ &\frac{1}{2} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos(\alpha - 240^\circ) = \\ &\frac{3}{2} F_{\phi 1} \cos \omega t \cos \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 交流电机定子绕组三角形接法, 在外部电源缺相的情况下, 三相绕组产生的合成基波磁动势为脉振磁动势。在该故障情况下, 电机无法正常启动。如果电机在正常运行时发生供电电源断线导致的缺相故障, 电机定子绕组电流会有一定程度的增加, 转速和转矩波动大, 系统将无法稳定运行。

2.3 能耗制动绕组磁动势分析

基于解析法不仅可以对交流电机定子绕组星形接法缺相、定子绕组三角形接法电源供电及绕组断线缺相等特殊情况产生的磁动势进行分析, 而且对于交流电机能耗制动过程中的磁动势也可以进行分析。能耗制动将处于电动状态的三相异步电动机切断电机的三相交流电源, 同时在定子绕组通入直流电。

交流电机定子绕组通入直流电流之后产生的磁动势对于能耗制动过程的分析至关重要。定子绕组能耗制动时, A、B 两相绕组通入直流电时磁动势的分析如图 3 所示。

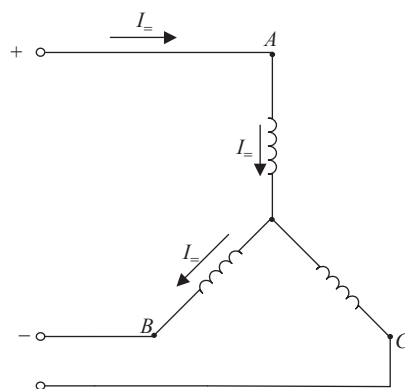


图 3 能耗制动磁动势分析

假设定子绕组星形接法, 直流电流 I_d 从绕组 A 流进, 绕组 B 流出, 则 A、B 两相绕组分别产生

的磁动势为:

$$\begin{cases} f_A = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\Sigma} \cos \alpha \\ f_B = -\frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\Sigma} \cos(\alpha - 120^\circ) \end{cases} \quad (10)$$

则 A、B 两相绕组合成的磁动势为:

$$f = \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\Sigma} \cos \alpha - \frac{4}{\pi} \frac{1}{2} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\Sigma} \cos(\alpha - 120^\circ) = \sqrt{3} \frac{2}{\pi} \frac{N_1 k_{dp1}}{p} I_{\Sigma} \cos(\alpha + 30^\circ) \quad (11)$$

从式(11)可以看出,此时磁动势是一个空间固定的磁动势。该磁动势相对于旋转的转子来说,可以认为是旋转的磁动势,转子受到与运动方向相反的电磁转矩的作用,处于制动状态。

能耗制动过程将电机转动部分储存的动能转换为电能消耗在转子回路。将能耗制动时绕组通入直流电流产生的磁动势幅值 F_{Σ} 与三相交流电流流过交流绕组的磁动势幅值等效,即可以确定定子的等效电流。

3 结束语

本文基于解析法对交流电机电枢绕组的磁动势进行分析的基础上,进一步对交流电机定子绕组星形接法缺相故障、定子绕组三角形接法电源供电及绕组断线两种缺相故障、交流电机能耗制动等几种特殊情况产生的磁动势进行分析。近5年来,通过在电机与拖动基础课程教学过程中进行的探索和改革,收获了良好的教学效果。将本文提出的解析法应用于交流电机电枢绕组磁动势的实际教学当中,可以取得以下明显效果。

1) 基于解析法对交流电机电枢绕组的磁动势进行分析,在一定程度上化解了课程的教学难度,为进一步掌握三相异步电动机的工作原理奠定了基础。

2) 采用解析法进一步对交流电机定子绕组星形接法缺相、定子绕组三角形接法电源供电及绕组断线缺相、交流电机能耗制动等几种特殊情况产生的磁动势进行分析,有助于学生系统、全面地理解交流电机的磁动势,便于分析电机在正常和缺相等情况下的工作情况。

3) 本文的研究重点是在现有磁动势合成的公式基础上,对电机以上几种特殊情况的磁动势利用解析法进行理论分析,通过所得到的磁动势表达式判断电机的工作情况。通过教学理论上的分析,在缺相情况下电机由于不能形成旋转磁场,故三相异步电动机应该是不能正常起动运行的。在本文缺相情况下磁动势的理论分析基础上,今后的教学中也将逐步开展异步电动机缺相起动与缺相运行的教学实践演示或实验指导。

参考文献

- [1] 孙旭东,王善铭.电机学[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [2] 李发海,王岩.电机与拖动基础[M].4版.北京:清华大学出版社,2012.
- [3] 胡虔生,胡敏强.电机学[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 林瑞光.电机与拖动基础[M].3版.杭州:浙江大学出版社,2012.
- [5] 冯海涛,潘岗球,龙航.基于Matlab/Simulink的异步电机矢量控制仿真分析[J].实验科学与技术,2015,13(2):9-12.
- [6] 王昊.基于MATLAB的“电机与拖动基础”教学探讨[J].教育现代化,2018(53):194-196.
- [7] 仇志坚,黄苏融,代颖,等.“电机与拖动基础”Matlab仿真实验教学研究[J].电气电子教学学报,2019,41(1):134-137.
- [8] 陈高燕,何建平,祁强.《电机与拖动》实验课程的教学视频案例设计[J].实验科学与技术,2014,12(5):121-124.
- [9] 荆建立,史成芳.电机类实验工程化教学研究[J].实验科学与技术,2016,14(3):132-134.
- [10] 朱志莹,万琦,柏杨,等.“电机学”课程混合式教学改革实践[J].电气电子教学学报,2018,40(6):50-53.
- [11] 应黎明.科研反哺教学在“电机学”教学中的实践[J].电气电子教学学报,2018,40(5):13-16.
- [12] 郭欣欣,陈晓辉.CDIO理念下电机学课程教学改革研究[J].实验室科学,2018,21(4):154-156.
- [13] 杨俊华,潘珊珊,邓则名.电机学教学中若干问题探讨[J].电气电子教学学报,2001,23(1):115-117.
- [14] 刘瑞芳.交流电机旋转磁场的教学研究[J].电气电子教学学报,2011,33(5):82-84.

编辑 张莉