

变极绕组新的设计原理

钱罗奋

(集美大学, 福建 厦门 361021)

摘要: 本文介绍一种新的变极电机绕组设计原理, 它以“安导元”作为基础。用此原理设计的变极绕组, 无论变极前后都等效于整距绕组。文中论述了“安导元”的定义及以“安导元”为基础的变极原理, 并给出设计方法, 然后以 8/2 变极为例加以说明。

关键词: 交流电机; 变极; 整距绕组; 安导波; 安导元

中图分类号: TM 344.4

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2005)01-0061-04

引言

变极电机设计, 历来都是以线圈为基本单位的^[1]。同一种节距要适应不同的两种或多种极距很困难。早期国外工程师曾提出以几何直径作为全部线圈跨距的尝试, 但因跨距大、费铜线、电阻及电抗增大影响性能而没能得到应用。作者提出了以“安导元”作为基础的变极设计方法, 于 1990 年取得了发明专利^[2], 但鲜为人知。十多年来, 作者进行了从双速到三速四速、从反向法到换相法的各种试验, 证明了这一新的变极设计方法是正确的、成功的。此变极的要点是用“安导元”设计代替线圈设计。本文从深层次的原因——“安导元”的幅度系数和分布系数来分析其合理性的一面。文中论述了“安导元”设计的理论基础、基本原理和基本方法。

1 变极绕组设计的安导基础

交流绕组变极的本质是一部分导体被改变电流方向或相位。这里把引起变极的最小载流单元称为“安导元”。即“安导元”是指处于同一槽位又有相同电流的一束导体, 是指一扎线圈的圈边。在单层绕组中, 一个“安导元”对应一个槽号; 双层或 N 层绕组中, 一个槽号对应于 2 个或 N 个“安导元”。

设单个“安导元”在空间所占的角度为 Q_s , “安导元”中所有导体电流的总和为 i_s , 坐标原点设在所研究的单个“安导元”中心 (见图 1)。由安导波理论^[1]可知, 单个“安导元”在气隙圆周上产生的安导波为:

$$I_s(X) = \sum_{v=1} \frac{i_s}{K_{sv}} \cos v x \quad (1)$$

其中 $K_{sv} = \frac{\sin(vQ_s/2)}{vQ_s/2}$ 为槽口系数

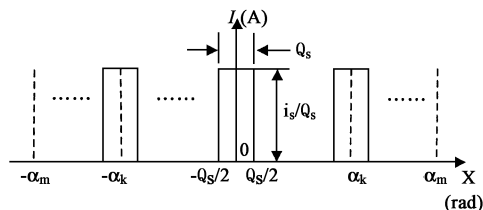


图 1 安导波

Fig. 1 Ampere-conductor wave

对于距原点任意空间角度 x_k 的“安导元”来说, 其安导波的表达式为:

$$I_k(x) = \sum_{v=1} \frac{i_s}{K_{sv}} \cos v(x - x_k) \quad (2)$$

若定子内表圆周对于一相来说有 $2m$ 个安导数相同的“安导元”, 对称分布在坐标原点二边。则它们联合产生的安导波是把每个“安导元”的安导波按同次谐波叠加:

$$\begin{aligned} I(x) &= \sum_{v=1} \frac{i_s}{K_{sv}} \sum_{k=1}^m [\cos(vx - vx_k) + \cos(vx + vx_k)] \\ &= \sum_{v=1} \frac{i_s}{K_{sv}} 2 \cos vx \cdot \cos vx_k \\ &= \sum_{v=1} \frac{2}{K_{sv}} \cos vx \left(\sum_{k=1}^m i_s \cos vx_k \right) \\ &= \sum_{v=1} \frac{2}{K_{sv}} \cos vx \left(\sum_{k=1}^m A_{kv} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $A_{kv} = i_s \cos vx_k$ 为单个安导元分布幅度。

收稿日期: 2004-07-19

作者简介: 钱罗奋 (1946-), 男, 上海籍, 副教授, 长期从事变极电机研究。

设 $K_{qv} = \frac{1}{m} \left| \frac{i_s}{i_s} \right|_{k=1}^m A_{kv}$ 为安导元分布系数,

$$\text{则 } I(x) = \frac{2m}{v} \left| \frac{i_s}{i_s} \right|_{k=1} K_{sv} K_{qv} \cos vx \quad (4)$$

由(4)看出, $2m$ 个“安导元”形成的安导波包含了一系列谐波,若要形成指定 P 对极数的安导波,应当使每个“安导元”在 P 对极下的分布幅度 A_{kv} 为正(分布系数较大): $A_{kv} = i_s \cos P_k > 0$

即 $(i_s > 0) \quad (\cos P_k > 0)$

或 $(i_s < 0) \quad (\cos P_k < 0)$

要求:正“安导元”($i_s > 0$)分布在电气相位角为

$$2n - \frac{\pi}{2} < P_k < 2n + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

的范围内;负“安导元”($i_s < 0$)分布在电气相位角为

$$2n + \frac{\pi}{2} < P_k < 2(n+1) - \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

的范围内; [n 为 $0 \sim (P-1)$] 的自然数。

若正“安导元”电气相位角处在(6)式区域或负“安导元”电气相位角处在(5)式区域内,则应使其反向。

这就是说,每个“安导元”在相位图上(无论变极前后),与本相中心的相位距离都不应超过 $\frac{\pi}{2}$ 。当超过 $\frac{\pi}{2}$ 时,“安导元”对本相所起作用为削弱磁势。

(4)式表明: P 对极安导波的形成只取决于气隙圆周“安导元”的分布,而与线圈节距无关。对于(4)式余弦分布的安导波,即 x 方向电流线密度分布波,可以简化写成: $I(x) = I_m \cos x$ 。在定转子与气隙之间,围绕电流层作一矩形回路 L ,应用安培环路定律^[3],并忽略定转子铁心中的磁势压降,可得气隙中磁场强度 $H(x)$ 和磁密 $B(x)$ 的分布:

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{H}(x) d\vec{l} &= \int_L H(x) dl = 2 \int_0^x H(x) a = I \\ 2H(x) a &= \int_{-x}^x I(x) dx = 2 \int_0^x I_m \cos vx dx \\ B(x) &= \frac{\mu_0 I_m}{av} \sin vx \end{aligned} \quad (7)$$

(7)式说明:在气隙圆周上形成了沿 x 方向、极对数为 P 的正弦分布磁密。对应于 P 对极安导波则形成 P 对极磁密波。

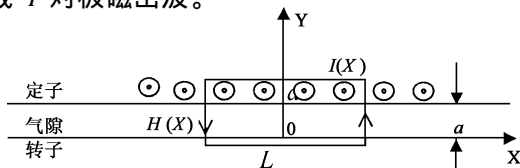


图2 电流及磁密分布

Fig. 2 Distribution of current and magnetic flux density

2 传统变极的缺陷、新的设计方法

变极电机传统的设计方法,是以线圈为单位的。从“安导元”的观点来看,一个短距线圈的作用,可以看成是线圈上层边(安导元)和下层边(安导元)共同分布的结果。变极时,线圈的上层“安导元”和下层“安导元”以同样的性质发生了改变(反向或换相)或不变。当所有跨距相同的短距线圈以上层“安导元”为基准分配及变极时,有些线圈可能出现这种情况:它在变前极中,上层“安导元”与下层“安导元”的分布幅度都是正的,位置都是恰当的;在变后极中,上层“安导元”的分布幅度是负的需要反向,但下层“安导元”与本相中心的距离在相位图上未超过 $\frac{\pi}{2}$,分布幅度是正的,不需要反向。而以线圈为单位反向的结果,却使不需要反向的下层“安导元”也跟随上层“安导元”反向,超出了 $\pm \frac{\pi}{2}$ 范围,于是造成了分布系数的损失。如后面例子 $8/2$ 变极 A 相的 A_{18} 作为线圈时的情况(参考图3和后面图5):

当线圈跨距 $Y=13$ 时, A_{18} 的下层“安导元”是 A_{-5} 。在2极中 A_{18} 处在距 A 相中心(图5有箭头标注处) 125° 位置,分布幅度是负的需要反向,反向后距 A 相中心 55° ,分布幅度变为正的; A_{-5} 原处距 A 相中心 75° 位置,分布幅度是正的不需要反向,反向后距 A 相中心 105° ,反而使分布幅度变成负的。这说明短距线圈上下层“安导元”的电流状态改变目标不一致,导致相带变宽,分布系数减小。或者说变极后迫使线圈乘上不适宜的短距系数。

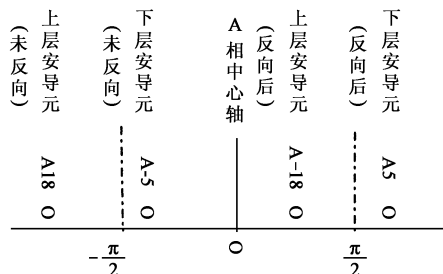


图3 安导元的反向

Fig. 3 Reverse of ampere-conductor unit

现在如果以“安导元”作为基本变极单位,事先不设置线圈的节距,只设置一定数量的正、负“安导元”。为组成线圈的需要,使正、负“安导元”的设置数量相等。在变极中,把需要反向的(分布幅度是负的)正、负“安导元”组成线圈,把不需要反向的(分布幅度是正的)正、负“安导元”也组成线圈。这样组成

的线圈既适合于变前极,又适合于变后极,完全不需再乘短距系数。具体做法为:先在变前极中设置数量相等的正、负“安导元”,用极幅调制法或对称轴线法找出需要反向的“安导元”,并调整调制波或对称轴,使需要反向的“安导元”正、负数量相等。然后把同相属、同变化性质的正、负“安导元”配对组成变极线圈。这一方法的实质是对线圈节距的统一设计,只有统一设计才能形成合理的变极线圈。传统的变极设计理论忽视了这个问题的。因变极而造成的短距与为改善波形而设置的短距,本质上是有所区别的,所以传统的变极绕组的短距并不正常。节距的统一设计方法是否失去了原先短距削弱谐波的手段呢?这也不会。因为任何短距线圈也可以转化为“安导元”分布。可以事先为克服谐波而调整好“安导元”分布,然后再联成线圈。比方做成“部分短距”形式。

3 新型变极绕组的等效整距意义

上述新型变极绕组虽然在几何尺寸上不是变极双方的整距,但因它的绕组系数等于分布系数,不存在短距系数,故相当于线圈上层边以此分布,而线圈跨距等于极距的双层绕组相同的效果(因整距线圈的上层“安导线”与电流反向的下层“安导线”在相位图上是处在同一个位置,整距线圈上下层边全部用“安导线”来表达的分布状况与新型变极绕组相同)。如同普通单层绕组那样,它可以看成是物理意义上的等效整距绕组。且这种绕组对于变极前后都体现出等效整距的意义。

4 新型变极绕组设计的基本方法

考虑每个分组中,正、负组成线圈的需要,“安导元”总数应为:反向法时为 4 的倍数,换相法时为 6 的倍数。当槽数能被 4 或 6 整除时,可以形成单层绕组。否则应在槽内设置合适倍数的“安导元”。

4.1 “安导元”在变极前后的分配

先使变前极每相含有数量相等的正、负“安导元”。在反向法变极时,使每个反向组含有数量相等的正、负“安导元”;采用对称轴线法求解时^[1],被轴线分隔的每相两半“安导元”都是半数正,半数负。

换相法变极时,每个换相组所含的“安导元”是半数正,半数负。

4.2 “安导元”的同属性配对

属于同一相的不反向“安导元”正、负互配;属于同一相的反向“安导元”正、负互配;属于同一换相组的“安导元”正、负互配。

4.3 线圈节距的选择

“安导元”互配要考虑节距短、嵌线方便及并联支路对称。

5 举例说明

通过 8/2 变极(定子用 36 槽)说明。

5.1 确定变前极 8 极三相“安导元”分布

36 槽可采用单层绕组设计,每一相都选择数量相等的正、负“安导元”。为使三相保持对称,每一次在三个互隔 120° 电角度的位置,同时选三个“安导元”。图 4 画出了 8 极的三相“安导元”分配。

5.2 用对称轴线法求 2 极“安导元”分布

在 2 极相位图上标出所选 8 极三相“安导元”如图 5 所示。选择对称轴线,把一相“安导元”分成正反两组(用下划实线和虚线分开),使轴线左右两组都包含数量相等的正、负“安导元”。

5.3 “安导元”组合成线圈

在每相的正向组和反向组中,把正、负“安导线”按表 1 所示联结,组成正向线圈组和反向线圈组。联结形成的单层绕组节距如图 6 所示。

5.4 绕组系数和谐波含量

“安导元”的分布系数即绕组系数。参考(4)式

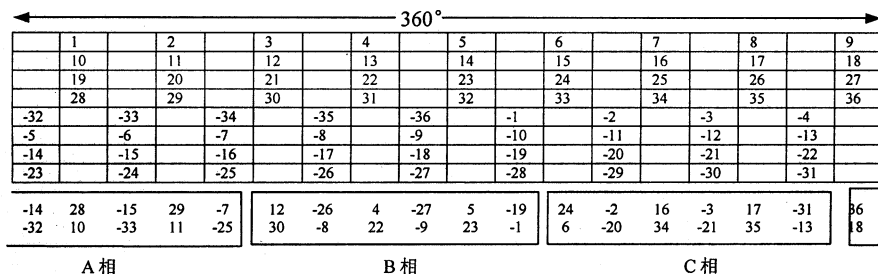


图 4 8 极安导元分布

Fig. 4 Distribution of 8 pole ampere-conductor unit

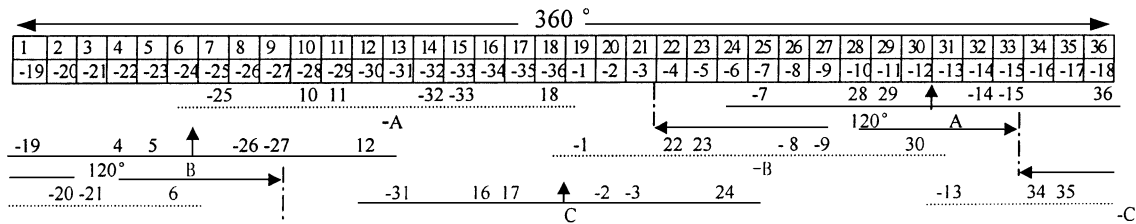


图 5 2 极安导元分布

Fig. 5 Distribution of 2 pole ampere-conductor unit

表 1 安导元的组合

Tab. 1 Composition of ampere-conductor unit

	A 相	B 相	C 相
正向 线圈	36 — - 7 (Y=7) 28 — - 14 (Y=14) 29 — - 15 (Y=14)	12 — - 19 (Y=7) 4 — - 26 (Y=14) 5 — - 27 (Y=14)	24 — - 31 (Y=7) 16 — - 2 (Y=14) 17 — - 3 (Y=14)
反向 线圈	18 — - 25 (Y=7) 10 — - 32 (Y=14) 11 — - 33 (Y=14)	30 — - 1 (Y=7) 22 — - 8 (Y=14) 23 — - 9 (Y=14)	6 — - 13 (Y=7) 34 — - 20 (Y=14) 35 — - 21 (Y=14)

K_q 计算主波和谐波如下: 8 极绕组系数 $K_{w8} = 0.8312$, 5 次和 7 次谐波分量分别为 4.53 % 和 2.64 %;

2 极绕组系数 $K_{w2} = 0.8153$, 5 次和 7 次谐波分量分别为 1.86 % 和 2.04 %。

采用传统的线圈变极方法, 8 极和 2 极都须乘

以短距系数, 其中以节距 $Y = 14$ 为最有利: $K_{w8} = 0.9848$, $K_{w2} = 0.9397$, 绕组系数分别为 $K_{w8} = 0.8186$, $K_{w2} = 0.7661$ 。但由于“安导元”分布已使 5 次和 7 次谐波很小, 所以就没有必要采用短距形式了。另外采用了单层绕组, 使定子槽利用率提高。这也是“安导元”变极法的优点。

5.5 线圈组的内部联接及外部出线头

在电机内部, 把上述形成的各个线圈根据同一相的正向组或反向组的属性, 按电势相加的原则串联起来。它不需像普通电机绕组那样有序, 同一组内的各线圈之间联接次序可以任意的, 最后形成一个线圈组有二根出线就可以了。各线圈组之间按 $Y/2Y$ 或 $/2Y$ 接法联接, 与一般的反向变极一样, 电机外部出线头为 6 个。本方案宜采用 $Y/2Y$ 接法。

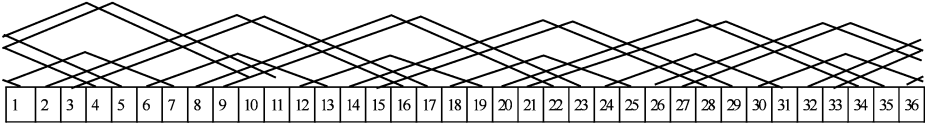


图 6 绕组节距

Fig. 6 Winding pitch

6 结论

以“安导元”为基础设计的变极绕组, 克服了传统的线圈变极的缺陷, 它能同时适应变前极和变后极的要求。它使变极前后线圈节距的设计得到统一。这种绕组虽然在几何尺寸上不是变极双方的整距, 但它的绕组系数等于分布系数, 不存在短距系数。这种变极绕组对变极前后都体现出等效整距的意义。采用“安导元”为基础的变极设计, 从理论上讲, 可以使所有传统方法设计的变极绕组系数都得到提高。绕组系数的提高即意味着定子电阻和漏抗减小, 从而使定子铜耗减少、效率提高、电机出力增加^[4]。另一方面, 这一设计能使变极绕组以单层形式出现, 使多种极比的变极设计显得简捷, 而对于

3Y/3Y 原先不对称方案的调整, 则变得容易可行。总之, 以“安导元”为基础的方法, 使变极绕组的设计更加合理。“安导元”变极法设计的绕组会出现节距不等, 所以对于并联支路安导元的分配应是对称的, 使节距做到对应相等, 不影响并联。

参考文献 (References):

[1] 许实章 (Xu Shizhang). 交流电机的绕组理论 (Winding s Theory for Alternating Current Machines) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1985.

[2] 钱罗奋 (Qian Luofen). 交流三相单绕组电机的变极方法 (Method of Single Winding Pble-chaging for Three Phase A. C Motor) [P]. 中国专利 (China Patent): 85103031, 1990-02.

[3] 冯慈章, 马西奎 (Feng Cizhang, Ma Xikui). 工程电磁场导 (下转第 80 页, cont. on p. 80)

Jianhua). 一种基于 $\mu\text{C}/\text{OS-2}$ 的电力系统数字继电器通用软件平台 (A digital relay software platform based on $\mu\text{C}/$

OS-2) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2004, 23(1): 72-76.

Application of modular design on automatic bus transfer

LIN Wei-ke, LI Zhi-kang, HUANG Yi-zhuang

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With reference to the typical main connection diagram of mid- and low-voltage substations, the software and hardware design of automatic bus transfer device are simplified properly by applying the decomposition method in modularization. Universal modules can be established through decomposing the functions of the software and hardware. The devices made up of these adaptable modules meet the requirements of the typical main connection diagram and operate with high reliability, self-adaptation and good economical performance. Modular design will be widely adopted in automatic bus transfer.

Key words: modularization; automatic bus transfer; universal property

(上接第 64 页, cont. from p. 64)

- 论 (Introduction to Engineering Electromagnetic Fields) [M]. 北京: 高等教育出版社 (Beijing: Higher Education Press), 2000.
- [4] 陈世坤 (Chen Shikun). 电机设计 (Design for Electric Machine) [M]: 北京: 机械工业出版社 (China Machine Press), 1986.
- [5] 彭晓, 石安乐, 邓秋玲, 等 (Peng Xiao, Shi Anle, Deng Qiling, et al.). 高起动品质因数感应电动机绕组的设计 (Research on induction motor with quick-starting quality factor) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2003, 22(4): 25-27.
- [6] 杨向宇, 彭晓, 励庆孚 (Yang Xiangyu, Peng Xiao, Li Qingfu). 不断电切换变极调速电动机绕组的研究 (Study on pole-changing windings without main interruption for three-phase induction motor) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2000, 19(1): 59-63.
- [7] 钱罗奋 (Qian Luofen). 反向与换相混合变极绕组的并联支路数算法及等效绕组 (Calculation of parallel branch number and equivalent winding for compound pole changing winding) [J]. 中小型电机 (S & M Electrical Machines), 2003, 30(1): 18-20.
- [8] 钱罗奋 (Qian Luofen). 按负载要求设计反向法和换相法相结合的变极电机 (Design of variable-pole machine by using reversing and commutating method according to various loads) [J]. 中小型电机 (S & M Electrical Machines), 2002, 29(5): 20-22.

A new design principle for variable-pole winding

QIAN Luo-fen

(Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper introduces a new principle of design for variable-pole motor's winding. This principle of the design is based on ampere-conductor-unit in order that it adapts itself to different polar distance. By using it the variable-pole motor's winding is equivalent to full-pitch-winding, whether the motor's pole changing or not. By using traditional method of design based winding-unit, the variable-pole motor's winding is shown with different short-pitch factor in different polar distance. The paper analyzes the cause of the winding short-pitch factor and presents the improved method of design. The paper gives a definition of ampere-conductor-unit, and presents this design principle based on ampere-conductor-unit for variable-pole winding. Then the design method is given with a $8/2$ pole changing as example.

Key words: AC electric machine; variable-pole; full-pitch-winding; ampere-conductor wave; ampere-conductor unit