

直流电动机向无换向器化发展的归宿 不是同步电机而是广义的直流电动机

童钟良

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 首先阐述直流电动机的自控变频运行机制, 磁极 d 轴的检测是电枢电流相位自控的先决条件, 磁极位置检测器件或方式的改革演变可视为直流电动机向无换向器化发展的标志。无换向器电动机是直流电动机向无换向器化发展的起步, 继而开发正弦交流电机本体的自控变频电动机系统, 包括矢量控制技术中的应用。今后更可借助计算机控制技术来检测磁极 d 轴的位置和转速, 实现电枢电流或电压的相位自控, 推动直流电动机无换向器化进程的深入发展。然而, 发展的归宿不是同步电动机而是广义的直流电动机。

关键词: 直流电动机; 电机本体; 磁极 d 轴检测; 自控变频; 电流相位自控; 气隙磁场箝位

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0095-05

Outcome of Development on DC Motor less Commutator Generalized DC Motor Rather than Synchronous Motor

TONG Zhongliang

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science,
Shanghai 201620, China)

Abstract: The operational mechanism of DC motor with self-controlled frequency was explained at first. Sense on polar d -axis was a prerequisite for self-controlled phase of armature current. Reform and evolution of the position sensor may be regarded as a mark of development on DC motor less commutator. The commutatorless motor was the forerunning of the development on DC motor less commutator. The successor was the motor system with self-controlled frequency consisted of the motor-body with sinusoidal current, including application of the transvector control technique. Sense on position and speed of polar d -axis in order to self-control the phase of armature current or voltage with the help of computer-assisted controlling technique may be developed hereafter. It would gave an impetus to progress towards deepened development on DC motor less commutator. However, the outcome of development becomes of the generalized dc motor rather than synchronous motor.

Key words: DC motor; motor-body; sense on polar d -axis; self-controlled frequency; self-controlled phase; field clamped effect in air gap

0 引言

直流电动机在调速和转矩控制性能方面具有突出优点, 但是存在换向火花。随着科学技术的发展, 许多领域里即使微小的火花也不允许存在, 因此, 早从 1960 年代开始, 改革“换向器式电机^[1]”的研究就已启动, 可这项研究从一起步就

陷入了认识上的误区。

1970 年代以后许多文献认为: 无换向器电动机是由静止变频器、同步电动机和磁极位置检测器三部分组成的^[2]。这种见解后来占了上风, 致使改革换向器式直流电动机的研究转向, 转为研究同步电动机的自控变频技术及转矩控制问题。

文献[3]是著名的经典教材, 精辟地指出: 同

步电动机运行中存在瞬态摆振^[4]现象。由此可见,自控式同步电动机不存在转子失步问题^[5]的说法,其实是与同步电机经典理论冲突和矛盾的。

然而,恰是文献[3]从第六版起增加了“转速与转矩控制”一章,第七版中的 10.2.2 节就是同步电动机的转矩控制。实际上,同书第 5 章同步电机运行原理表明,同步电动机的电磁转矩是不可能人为调控的。

无刷直流电动机的早期文献则说它由电动机本体、位置传感器和电子换向线路所组成^[6]。此说法才接近换向器式直流电动机的构成情况。

1 换向器式直流电动机的构成及电枢电流的形式

侧视观察直流电动机,可视为其包含前后两段,前段是电刷和换向器,后段常称作电机本体。

至于电枢电流究竟是直流还是交流?站在不同立场上观察可得不同的认识。

绕组元件处在转动的电枢上,故元件电流实际是交变电流。但若从静止的电刷上观察转动的电枢,由图 1 表明两电刷间构成一对并联支路,绕组元件轮流入各条支路,则支路内的绕组元件不断替换,而支路电流却显示为直流。《电机学》就是按照支路电流为直流的观点展开讨论的。

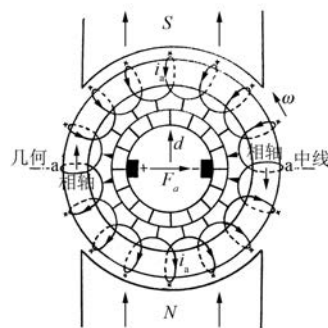


图 1 直流电动机工作原理

2 基于交流观点的直流电动机自控变频原理

2.1 自控变频与电流相位自控

转动的绕组元件每经过一对磁极,元件电流交变一次。若绕组元件沿气隙圆周每秒转过 ω 电弧度,元件电流的角频率 ω_s 就等于 ω ,即 $\omega_s =$

ω 。可见,电枢电流的角频率 ω_s 取决于电枢转动的电角速度 ω ,符合自控变频的含义。

图 2(a)绘出忽略换向电流的绕组元件电流波形。图 1 中的元件 a 被电刷短路,表明该元件电流正在换向,若是直线换向,则换向电流的变化如图 2(b)所示。故元件 a 每经过一对磁极,包括换向电流在内的电流波形如图 2(c)所示是近矩形的梯形波。

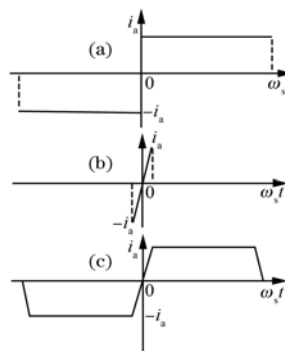


图 2 绕组元件电流波形

梯形波电流通过零值的瞬间正是元件电流换向的瞬间。梯形波电流相位控制的特点,就表现在对电流经过零值之瞬间的控制,亦即对换向瞬间的控制。由于换向元件恰被电刷短路,所以换向发生的时刻必与电刷被放置的地点有关,也说明梯形波电流的相位是受电刷所在位置控制的。

《电机学》所说“电刷置于几何中性线上”,是指电刷位于 q 轴上,并与 d 轴正交。梯形波电流的相位受电刷所在位置的控制实质上反映受 d 轴位置的控制,即直流电动机中的电枢电流相位自控。

2.2 气隙磁场钳位

若取基波电流分量分析电枢磁动势沿气隙的分布,电枢磁动势的幅值位置必与那个绕组元件中梯形波电流的基波分量取得最大值相关。因为《电机学》已指出,如果对称多相绕组中流过对称多相正弦电流,则哪一相电流达到最大值,合成磁动势的幅值就落在该相轴上。直流电动机的电枢绕组本是对称多相绕组,每个绕组元件相当于一相绕组,但绕组元件处在转动的电枢上,故相轴处在转动状态之中。

如果电刷置于几何中性线上,每当绕组元件被电刷短路且元件电流经过零值的瞬间,该绕组

元件的轴线必沿 d 轴方向。当电枢转过 90° 电角度之后,该绕组元件的轴线沿 q 轴方向时,元件电流中的基波分量恰达最大值。

由于电刷被固定地放在几何中性线上,故无论对哪个绕组元件来说,凡当相轴转成与 q 轴方向一致时,该绕组元件中基波电流必抵最大值,于是,电枢磁动势的轴线便恒久地落在 q 轴方向上。

电枢磁动势的轴线始终与主磁极的 d 轴保持固定不变的空间交角,正是由于电枢电流相位自控的结果,这种态势就称为气隙磁场钳位效应^[7]。

2.3 磁极 d 轴检测

电枢电流相位自控的先决条件是须对主磁极 d 轴的位置及转速进行检测,主磁极位于定子便无需转速检测。电刷置于几何中性线上的意思还表明怎样放置电刷就涉及对主磁极 d 轴位置的检测。电刷置于何处其实取决于刷座(又称刷握盒)的所在位置,由于电动机运行中电刷需要更换而刷座不会更动,所以,在电动机出厂前将刷座对主磁极 d 轴的间隔距离调整好,刷座便起到检测主磁极 d 轴位置的作用。

电流换向虽是由电刷执行的,但换向机制——元件电流在刷座所在地实现换向的机制,却属于电机本体的运行机制,说明刷座属于电机本体所具有的器件。

既然换向还须依靠电刷执行,检测磁极 d 轴的刷座当然应是含有电刷的“带刷之刷座”(这也解释了为什么早期设计的磁极位置检测器总是带有可直接执行电流相位自控的功能)。可见电刷不仅仅只与换向器组成旋转逆变器,并且还依其所在位置执行换向的任务,表明电刷兼具双重功能。正是电刷的第二项功能,才使电刷-换向器这个旋转逆变器成为自控逆变器的。

3 直流电动机无换向器化引起电机格局的改变

无换向器电动机的电机本体须由静止变频器馈电,考虑到供电的安全可靠,就应将电枢安置在定子上,即采取反装式直流电动机的构造。随着电刷-换向器被取代,换向极已不需要了,而在转子磁极之间也难容纳补偿绕组,尤其是电枢改取三相绕组之后,转极式的电机本体在结构上就极

像同步电动机了。

既然馈电方式和电机格局有所改变,“带刷之刷座”亦须加以改造,发展成为结构上相对复杂些的磁极位置检测器。然而,刷座本是电机本体所具有的器件,毫无疑问,无换向器电动机中磁极位置检测器理应也属于电机本体的组成部分。换句话说,电机本体应是由电枢、主磁极和磁极位置检测器三单元所组成。

4 电机本体与同步电动机的区别

同步电动机是无需用器件或措施对磁极 d 轴进行检测的电机,故在运行中必定存在瞬态摆振。瞬态摆振是描述同步电动机运行机制的典型实例。

在同步电动机上介入磁极 d 轴检测(包括检测 d 轴位置、转速)的器件或措施,就会彻底改变其原来的运行机制,转成按照直流电动机的自控变频机制来运行。自控变频同步电动机能够消除失步与振荡的说法,其实已违背了同步电动机的运行机制。实际上,介入磁极 d 轴检测的同步电动机已被改造成电机本体了。

电机本体必定具备磁极 d 轴检测器件或措施以及相应功能。正是凭借磁极位置检测器执行的电枢电流相位自控,电机本体内产生气隙磁场钳位效应,才是消除失步与振荡的根本原因。

可见,目前电机界普遍认为无换向器电动机由静止变频器、同步电动机和磁极位置检测器三部分组成的观点值得商榷。这里的“同步电动机”已与磁极位置检测器紧密结成一体而为电机本体,所以,无换向器电动机是由静止变频器和电机本体两部分组成的电动机系统。该电动机系统中因有电机本体才使静止变频器转变为自控变频器的,除此之外,其他电动机系统中的静止变频器皆为他控变频器。

由电机本体与静止式自控变频器组成的电动机系统,可能没有“直流”环节,但其毕竟属于直流电动机的派生型式,故其为广义直流电动机^[7]。

5 正弦交流情况下的自控变频运行机制

5.1 正弦交流相位自控与气隙磁场钳位

三相绕组中若是流过三相方波电流,电枢磁

动势是步进式跳跃前进的旋转磁动势,致使电磁转矩起伏波动,电动机性能不如换向器式直流电动机。三相绕组中只有流过三相正弦电流,才能产生匀速而连续转动的旋转磁动势,获得平稳无波动的电磁转矩。

利用电子元件组成的静止逆变器可以对输出电流的波形进行调制,从方波中取出基波,成为输出正弦波电流的静止逆变器。这是电刷-换向器这种旋转逆变器办不到的。

三相对称正弦电流的表达式为

$$\begin{cases} i_a = I_m \sin \theta = I_m \sin(\omega_s t + \alpha) \\ i_b = I_m \sin(\theta - 120^\circ) = I_m \sin(\omega_s t - 120^\circ + \alpha) \\ i_c = I_m \sin(\theta - 240^\circ) = I_m \sin(\omega_s t - 240^\circ + \alpha) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ ——A 相电流 i_a 的相位角。

式(1)表明, i_b 和 i_c 总是分别比 i_a 滞后 120° 和 240° , 所以一般来说, 控制一相电流(例如 i_a) 的相位角 θ , 便可同时控制三相电流的相位。

$\theta = \omega_s t + \alpha$, 其中, 初相角 α 又是个定值, 这说明正弦交流的相位自控是与自控变频密切相关的: 只要电枢电流的角频率 ω_s 受到转子 d 轴转动的电角速度 ω 所控制, 那么, i_a 的相位角 θ 将随时受到 d 轴相对于 A 相轴的空间交角 θ 所控制。

此外, 在正弦三相电流情况下, 电枢电流的相位与旋转磁动势的空间位置关系也甚明朗。从《电机学》可知, 当某相正弦电流达到正最大值时, 合成旋转磁动势的幅值就到达该相轴的位置上。因此, 倘若某相电流的相位受到恒定磁动势 d 轴所控制, 那么, 电枢磁动势的幅值位置也必定受 d 轴位置所钳制, 即产生气隙磁场钳位效应。所以, 在正弦三相电流条件下, 电枢电流相位自控与气隙磁场钳位的关系十分明确。

5.2 电磁转矩可控性取决于气隙磁场钳位

文献[3]在第4章旋转电机概述中已给出按磁场观点导出的多极电机电磁转矩通用公式:

$$T = -kF_s F_r \sin \delta_{sr} \quad (2)$$

式中: 负号—— T 作用在使转子加速的方向上;

k ——常数;

F_s 、 F_r ——定子和转子磁动势的幅值;

δ_{sr} ——定、转子磁动势轴线间的空间夹角。

对于有一方为恒定磁动势的同步电动机和电机本体而言, 只有电机本体内才存在气隙磁场钳位

效应, 致使 δ_{sr} 成为定值。在此条件下, 倘若恒定磁动势的幅值 F_r 保持不变, 则式(2)中仅有唯一的变量 F_s , 故调节电枢电流就能控制电磁转矩。

5.3 矢量控制是实现正弦交流相位自控的措施

矢量控制应用在具有恒定磁动势的电机上, 实际上就是将电枢磁动势空间矢量钳制在 q 轴上, 强制产生气隙磁场钳位效应, 也就是对电枢正弦交流执行相位自控的具体措施。

在电机本体上应用矢量控制, 最简单的方案是按转子磁场定向的矢量控制。它是借助 $abc-dq0$ 坐标变换, 将正弦三相交流 i_a 、 i_b 、 i_c 变换成两轴直流 i_d 和 i_q , 然后在磁场定向控制器中限制 $i_d = 0$, 这一步正是具体执行电枢电流相位自控, 于是, 调节 i_q 就能像直流电动机那样控制电磁转矩了。

文献[3]中所述对同步电动机的电磁转矩加以控制, 就是应用矢量控制的所谓“同步电动机转矩控制”。既然其已指出装有磁极位置检测器, 便是对电机本体的转矩控制。文中却未阐述磁极位置检测器所发挥的电枢电流相位自控作用, 整番论述与同步电动机的运行机制完全矛盾。

6 直流电动机无换向器化的继续发展

6.1 电刷-换向器开创变频技术和自控技术的先河

原始的直流电机本是单极电机, 并没有换向器。近代换向器式直流电机的问世也带来了技术上的重大创举, 不仅开发了整流及逆变技术, 而且电刷-换向器还是自控逆变器, 它的应用也开创了变频技术和电流相位自控技术的先河。

6.2 磁极位置检测器件或方式的改革演变

由“带刷之刷座”演进的磁极位置检测器也并非是一成不变的东西, 其也在不断地更新与发展。无换向器电动机只要求磁极位置检测器输出3个脉冲信号, 用以触发6个电子开关元件轮流导通, 所以, 相对来说结构上还是比较简单的。正弦交流的电机本体就要求磁极位置检测器输出正弦交变的控制信号, 像光电编码器那样的磁极位置检测器结构上就相当复杂了。

矢量控制的广义直流电动机, 电机本体上所连接的旋转变压器仅用以检测转子 d 轴的位置角, 而电枢电流相位自控并非由旋转变压器直接

执行,而是发展了的磁极位置检测器。

当前,对无传感器(sensorless)自控技术的研究相当活跃,所谓“无传感器”无非是不使用具体的检测器件,但仍需要检测磁极 d 轴以实现频率和相位的自控。换句话说,虽然没有具体的器件,但相关功能与效果还是需要和存在的。

6.3 电力电子器件发展带来的改变

同步电动机的电枢采取三相绕组是为了配合电网的三相输电。电机本体是由静止变频器馈电的,所以在电枢相数的选择上便有灵活的余地。随着电力电子技术的进步,如今将静止变频器的输出端做成多相的已非难事。电枢采取多相绕组的好处是:即使相电流的波形为方波,也既能改善电枢磁动势的分布波形又能使电枢磁动势趋于匀速而连续地转动,就与三相绕组通入三相正弦电流有着相似的效果,但对磁极位置检测器却无须再苛求它输出正弦交变的控制信号了。

6.4 计算机控制技术促进广义直流电动机蓬勃发展

直流电动机向无换向器化的发展与计算机控制技术的进步关系更密。如今,不仅静止变频器可用新颖的电力电子器件来装备,而且还可运用先进的计算机技术开发新颖的自控变频器。但是值得指出,现成而独立的自控变频器是不存在的,因而也不可能设想把同步电动机接到现成的自控变频器上构成同步电动机调速系统^[8-9],实际上这里同步电动机必须配备磁极 d 轴检测已经转变运行机制了。举直接转矩控制为例,它原是对电压型逆变器与感应电动机作为整体进行控制的一项技术,若将直接转矩控制应用于具有恒定磁动势的电动机上,那么,原系他控性质的电压型逆变器必定转变成自控逆变器,而对电动机必须作磁极 d 轴位置与转速的检测,因而该电动机就不是同步电动机而是电机本体了。

尽管变频器技术和计算机控制技术不断创新和进步,但终究总是遵循直流电动机的自控变频运行机制而发展。所以万变不离其宗,其都是直流电动机发展的产物,而不是同步电动机的新发展或新型式。

7 结 语

人们致力于改革换向器式直流电动机的研究,并不意味着直流电动机已经走到了尽头。可是,文献[10]却把无换向器电动机编进了同步电动机那一章,等于宣告直流电动机没有发展前景了,显然是不对的。

换向器式直流电动机具有自控变频的运行机制是属于交流电机的特征,无非因为接在直流电源上运行而得名并且沿袭至今。直流电动机无换向器化是用静止变频器取代电刷-换向器的发展,却明显形成了电动机系统,而且整个电动机系统既可接至直流电源上亦可接至三相交流电源上运行,所以其应是广义直流电动机。

【参考文献】

- [1] WOODSON H H, MELCHER J R. 机电动力学 第一卷 离散系统[M]. 华中工学院电机教研室, 译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 许大中. 晶闸管无换向器电机[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [3] UMANS S D. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery Seventh Edition[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [4] STEPHEN U. Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery 电机学, 第七版[M]. 刘新正, 苏少平, 高琳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [5] 李发海, 朱东起. 电机学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] 叶金虎, 徐思海, 张颀明, 等. 无刷直流电动机[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [7] 童钟良. 自控变频“同步电动机”系统实为广义直流电动机[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(11): 31-35.
- [8] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [9] 袁登科, 徐延东, 李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [10] 唐任远, 顾国彪, 秦和, 等. 中国电气工程大典第9卷电机工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

收稿日期: 2017-01-20