

永磁同步电动机的弱磁扩速分析

尹华杰 (华南理工大学 广州 510641)

林金铭 金振荣 (华中理工大学)

【摘 要】介绍永磁同步电机的弱磁扩速原理以及弱磁扩速难的原因,评述国际上永磁同步电机弱磁扩速的方法和研究成果。指出将优化的控制方法和复合永磁转子结构相结合的对策是彻底解决弱磁扩速的最佳选择,并针对这种新型结构提出了尚需攻克的难点。

【叙 词】永磁电机 同步电动机 弱磁调速 /复合永磁转子 分析

的认识,影响了对永磁同步电机的扩速研究。

1 引 言

近10年来,由于钕铁硼(NdFeB)永磁材料的开发及性能的改善,永磁同步电机(包括无刷直流电机)转矩密度越来越大,优点越来越突出,在要求“短、小、轻、薄”、高精度、宽调速范围的许多驱动场合,得到了大量研究和应用。

然而,无刷直流电机励磁不可调,根本无法在高速下进行恒功率运行。即使是由正弦波PWM逆变器驱动、利用电流相位控制削弱永磁场的永磁同步电机,在高速下的输出功率也往往随速度增加而迅速下降,无法获得较为宽广的高速恒功率调速范围。永磁同步电机的这一缺陷严重限制了其进一步推广和应用。

扩展永磁同步电机的高速范围,扩大其输出功率,已经成为电机研究中的一个重要课题,引起了国内外许多学者的兴趣和关注。

2 永磁同步电机的弱磁扩速原理及弱磁扩速难的原因

永磁同步电机的扩速研究正在不断取得进展,但即使是站在这一研究前沿的人,有些也对扩速的机理以及扩速难的原因缺乏本质

2.1 弱磁扩速原理

和电励磁同步电机不同,永磁同步电机的转子励磁固定不变,永磁场产生的反电势和速度成正比,当电机端电压随转速升高到逆变器能够输出的最大电压之后,继续升高电机的速度,永磁同步电机将无法再作恒转矩运行,而必须采取下述措施之一(或兼而用之),以维持电枢绕组的电势平衡,从而获得一个新的调速范围。

措施1:对于可以进行电流相位控制的永磁同步电机,使直轴电流 $I_d \neq 0$,并起去磁作用,以削弱永磁场(即所谓弱磁),且随着速度的升高,起去磁作用的 I_d 分量要不断增加,电势平衡才能继续维持。这种弱磁能力的大小与电枢绕组的直轴电感 L_d 成正比。

措施2:使电枢电流的交轴分量 I_q 逐渐减小,从而减小其电枢反应的助磁作用及气隙合成磁场(这是一种等效弱磁)。这种弱磁能力的大小与交轴电感 L_q 成正比。要特别指出的是,尽管这一等效弱磁措施能够扩展电机恒转矩调速范围之外的调速范围(即弱磁范围),但它以牺牲恒转矩调速范围和输出转矩为代价。因此,其能力的大小对电机的总调速范围没有多大影响。相反,随着这种能力的

增大(X_d 的增大),恒转矩范围变窄,弱磁范围变宽,电机总的调速范围会有所减小,电机的输出转矩特性会越来越软。

无刷直流电机只能采用弱磁措施 2 进行等效弱磁扩速。弱磁时,随着速度的增加,电机的输入电流、输出功率都将迅速下降到零,因此无法作恒功率运行。

对于可以进行电流相位控制的永磁同步电机,是同时采用措施 1、2 进行弱磁扩速的。弱磁时,随着速度的增加,直轴电流 I_d 不断增加(直到 I_N),而交轴电流 I_q 不断减小(直到零)。只要电流分量控制适当,就有可能获得一个输出恒定功率的调速范围(即恒功率弱磁范围)。在不打破电流限制 $I \leq I_N$ 的情况下,能够获得宽广的弱磁范围的条件是,直轴电流为 I_N 时的直轴电枢反应去磁磁通能够完全消弱永磁通(指基波分量)。这时电机在理论上可以在任意的高速下进行弱磁运行,并输出基本恒定的功率。这一条件可表述为:

$$E_o \leq X_d I_N \quad (1)$$

式中, E_o 、 X_d 是电机在单位速度下的反电势和直轴电抗。电机能够在宽广的弱磁范围内输出尽可能大的功率的条件是, $I_d = I_N$ 时的直轴电枢反应去磁磁通能够正好抵消永磁通,或表述为:

$$E_o = X_d I_N \quad (2)$$

2.2 永磁同步电机弱磁扩速难的原因

在永磁同步电机驱动系统中(这里不包括无刷直流电机系统),即使采用弱磁扩速措施,也常常达不到预期的扩速效果,高速下的输出功率往往将随速度增加而迅速下降(打破 $I \leq I_N$ 的限制除外)。这就是永磁同步电机的所谓弱磁扩速难(简称弱磁难)。

永磁同步电机弱磁难的原因在于其磁路结构的特殊性。尽管永磁同步电机有多种多样的转子结构,但无论是并联永磁路转子还是串联永磁路转子(见图 1),永磁体总是串联在直轴磁路中,并占去交轴磁路的部分空

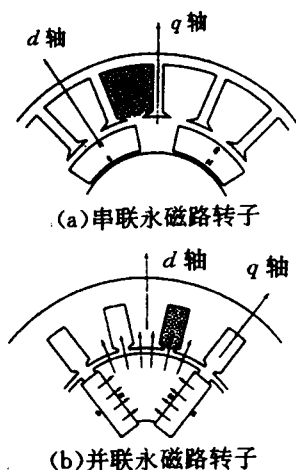


图 1 永磁同步电机不同转子结构

间。因此,交、直轴磁路的等效气隙都很大, X_d 、 X_q 都较电励磁同步电机的小得多,并有 $X_d \leq X_q$,其后果是,建立同样大小的电枢反应气隙磁场,永磁同步电机要求比电励磁同步电机大得多的电负荷,而在正常的电负荷(由热负荷能力确定)下,永磁同步电机的交、直轴电枢反应微乎其微。如果永磁体提供正常的励磁磁场(由永磁体的性能及定、转子铁心饱和磁密决定),则额定电流产生的直轴电枢反应磁通只能消弱永磁通的极小部分,用电势关系表述即为:

$$E_o \gg X_d I_N \quad (3)$$

所以,普通永磁同步电机不满足产生宽广恒功率弱磁调速范围的条件式(1)和式(2)。

式(3)是普通永磁同步电机的固有特性,是弱磁难的原因。大多数普通永磁同步电机(尤其是串联磁路结构)还具有另一个特点:

$$E_o > X_d I_N \quad (4)$$

因此等效弱磁调速的能力也较小。这对于输出转矩特性是有利的。

可见,增大 X_d 可以使永磁同步电机满足弱磁扩速方程(1)和(2),从而易于弱磁扩速;增大 I_N (但难以满足温升要求)或减小 E_o (但不利于充分发挥永磁体高磁能积、永磁同步电机高转矩密度的优点)也有同样的效果; X_q 尽管不影响调速范围,但小一点有利于改

善输出转矩特性。

3 永磁同步电机弱磁扩速的方案

对于永磁同步电机的弱磁扩速,国际上已有许多人作过努力,并提出了一些解决方案,其中有代表性的有三种:

a. 理查德·F·谢菲尔(Richard F. Schiferl)及森本茂雄等人从控制的角度研究了普通永磁同步电机($X_d \leq X_q$)的弱磁扩速,并导出了当逆变器输出电压 U 、电流 I 随速度升高分别达到并保持为电机的额定值 U_N 、 I_N 时,电机能够产生宽广恒功率弱磁调速范围的条件,和式(2)类似。认为在满足式(2)的条件下, $X_q - X_d$ 越大越好;而在式(2)得不到满足时,从输出较大功率着眼,认为 E_o 大一点好;而从获得尽可能高的电机转速考虑,又认为 E_o 小一点有利。

这一解决方案存在两个问题,在传统的永磁转子结构下,要使式(2)得以满足,只能使用很小的 E_o 和永磁励磁磁场,永磁电机高转矩密度的优点难以得到发挥;在低速下进行恒转矩运行时,试图利用 $X_q - X_d$ 来产生正的反应式转矩,以弥补因 E_o 过小而损失的永磁转矩,使过软的转矩特性变坚挺些。因此认为 $X_q - X_d$ 越大越好。通常,永磁同步电机的 X_q 值没有大幅度增大的可能,在 $X_q - X_d$ 大到一定程度后,要继续增大 $X_q - X_d$,就只能靠减小 X_d 、 E_o (而无法再增大 X_q)实现。结果在整个电机中,永磁成分将大大减小,而反应式成分却变化不大。这种用反应式成分取代永磁成分的做法,忽视了永磁同步电机相对同步磁阻电机的优势,只能是不得已而为之。

这一方案的一个极端例子是A·弗拉塔(A. Fratta)等人提出的在同步磁阻电机磁阻较大(反应式电抗小)的轴上放置微小永磁体励磁的作法,是以改善同步磁阻电机的性能和节省永磁体为目的的。

b. S·罗森舒科(S. Russenschuck)及H·威(H. Weh)等人介绍了改良普通永磁同步电机转子铁心结构形状(使 X_d 尽可能地大, X_q 尽可能地小),以改善永磁同步电机的输出特性和调速特性的方案(其磁路结构如图2所示)。这一方案并不能使 X_d 大幅度增加,但却显剧地减小了 X_q (可能达到 $X_d > X_q$)。在满足式(2)的情况下,和前一方案相比较,本方案可以采用较大的永磁磁负荷,但与正常能达到的永磁负荷相比,还是小得很。它可以使恒转矩运行时的输出转矩增大,恒转矩调速范围变小,使弱磁恒功率调速范围增大。但如果使用正常的永磁负荷,则仍然无法得到宽广的弱磁调速范围。这一方案的另一问题是永磁体容易产生不可恢复的去磁。

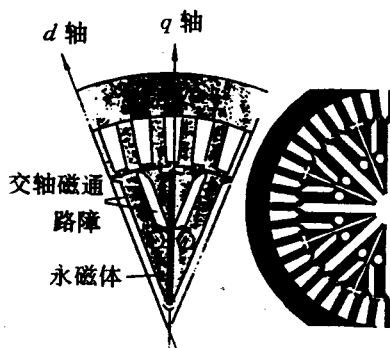


图2 改良永磁转子结构

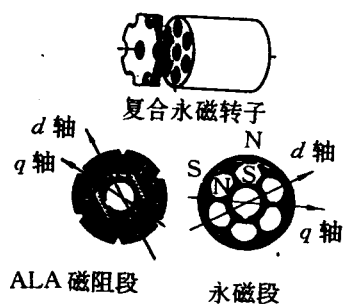


图3 复合永磁转子结构

c. 维纳·穆雷格尔(Werner Mühlegger)等人对图3所示的复合永磁转子同步电机(具有 $X_d > X_q$ 及 X_d 很大的特点)的弱磁扩速进行了实验研究,其使用的转

子由一个普通的永磁转子段和一个反应式磁阻转子段同轴联结而成, X_d 显著增大, 获得了明显的弱磁扩速效果。

这一方案有可能使式(2)在正常的电负荷和永磁励磁负荷下得以满足, 从而使永磁电机既发挥高转矩密度的优点, 又具有宽广的恒功率弱磁调速范围, 是解决弱磁问题的最佳选择。它的一个附加优点是, 弱磁磁通(直轴电枢反应去磁磁通)绝大部分不经过永磁体, 永磁体没有因去磁而产生失磁的危险。

但是, 由于没有考虑到逆变器参数与电机参数的配合及相互影响, 因此其所得实验结果离理想的弱磁扩速水平还相差很远。

总之, 永磁同步电机的弱磁扩速还有必要作进一步的探索。要以采用复合永磁转子结构为首选弱磁方案, 同时从电机结构和逆变器控制两个方面考虑, 既研究优化的电机结构, 又研究优化的控制方法, 并考虑电机、逆变器参数间的影响与配合。

4 弱磁型复合永磁转子结构的选择和优化

采用永磁转子段加反应式磁阻段的复合永磁转子结构是可能解决弱磁扩速的最佳方案。在复合永磁转子中, 尽管永磁段单位长度的交、直轴电感 L_d 和 L_q 都很小, 但反应式磁阻段的单位长度 L_d 却可以做得和普通异步电机的单位长度主电感 L_m 差不多, L_q 则可视需要做得很小。通过转子两部分电感的适当配合, 就能在较大的变化范围内获得所需要的交、直轴电抗 X_d 和 X_q , 以满足弱磁方程(2)以及控制的要求。反应式磁阻段有许多结构, 选择出最佳的结构并使其尺寸优化是这一方案实现的关键。

首先, 就反应式部分使用的软磁材料, 如果磁阻段对应的定、转子磁路采用普通的硅钢片, 则由于铁心磁饱和的存在, 要满足弱磁方程(2), 就要求反应式部分的长度在电枢总长度中占据较大比例(1/4~1/2), 从而使电

机的平均气隙永磁磁密(永磁负荷)显著下降, 使高转矩密度的优点得不到充分发挥。但如果反应式部分的定、转子铁心采用具有高磁导率、高饱和磁感应强度的软磁材料(如铁钴钕合金等), 则这种弱磁扩速方案的优点是显而易见的。软磁材料的饱和磁密越大, 满足式(2)的反应式磁阻段就越短, 电机的平均永磁负荷就越大, 优点就越显著。

其次, 反应式磁阻段具有多种多样的转子几何结构。如硅钢片与转轴平行迭装的交、直轴磁阻异性转子(Axially Laminated Anisotropical Rotor, 简称 ALA 转子, 见图 3); 开关磁阻电机中使用的凸极磁阻转子; 交轴磁通路障型转子(见图 4)等。大量资料表明, 无论哪种结构, 都能保证 $L_d/L_m > 0.95$, 并获得较大的 L_d/L_q 比值(其中以 ALA 型为最, 可高达 100, 交轴磁通路障型次之, 可达 10 左右)。具体选用哪种结构, 应视加工条件、需要的恒功率调速范围大小以及弱磁控制对参数 X_d 、 X_d/X_q 的要求而定。

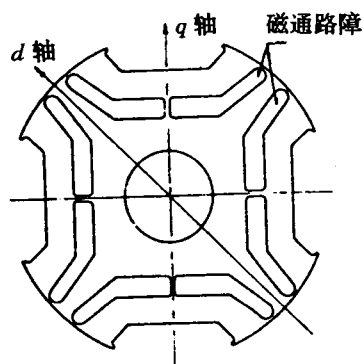


图 4 交轴磁通路障型磁阻转子

最后, 还必须对所选定的反应式磁阻段转子结构进行尺寸优化, 优化的目标就是使单位长度的 L_d 尽可能大, 而 L_q 合理地小, 从而尽可能地缩短反应式磁阻段在电枢中所占的比例。开发出精确计算磁阻段单位长度的交、直轴电感 L_d 和 L_q 的算法, 是这一步骤的主要任务。尽管早在 60 年代就有了解析地确定各类磁阻转子的 L_d 、 L_q 的初步思想, 但几

乎所有的方法都基于气隙磁导与气隙长成正比这一假定,这对于气隙变化很大、磁路很复杂、很饱和的情况,误差是很大的。

5 弱磁型复合永磁转子同步电机($X_d > X_q$)最佳参数的确定

在满足式(2)以及在转子长度、外径一定的条件下, X_d 越大,永磁同步电机的转矩密度和加速度就越大。但另一方面,电机电磁过渡过程的时间常数也越大,电机的动态响应特性变差,这对要求快速响应的伺服系统不利。

尽管当电机($X_d > X_q$)在低速下运行于单位电流产生最大转矩方式时, X_d/X_q 越大,输出的转矩就越大,效率也越高,但过大的 X_d/X_q 将导致弱磁运行时的一些局部区域功率因数过低,因此 X_d/X_q 应有一个合理的上限。

6 弱磁型复合永磁转子同步电机的控制策略

尽管弱磁型永磁同步电机($X_d > X_q$ 或 $X_d < X_q$)的优化控制原理都一样,即在低速下工作于单位电流产生最大转矩方式(以达到最高效率),在高速下工作于输入为额定容量的弱磁方式(以输出尽可能大的功率),但 $X_d > X_q$ 的复合转子永磁同步电机与 $X_d < X_q$ 的普通永磁同步电机相比,在控制的具体实

施上是有差别的。对于 $X_d < X_q$,电机无论是在低速下还是在高速下,都应运行于弱磁状态($I_d \neq 0$,且去磁),才能保证低速下产生正的反应式转矩。而对于 $X_d > X_q$,低速下的直轴电枢反应应处于助磁状态,以产生正的反应式转矩。

7 结 语

永磁同步电机具有广阔的应用前景,但由于其弱磁扩速困难,一般无法作高速恒功率运行,其推广应用受到了限制。采用复合永磁转子结构,有可能完美地解决永磁同步电机的弱磁扩速,使其既发挥高转矩密度的优点,又具有宽广的恒功率调速范围,应用于像机床主轴驱动等广阔的领域。

当前,普通永磁转子同步电机、同步磁阻电机都已得到了较多研究,但将这两种电机的转子组合在一起的弱磁型复合永磁转子同步电机,在理论和实验等方面都还要作更多的研究。这种研究的主要内容有,磁阻段交、直轴电感的精确计算,尺寸的优化;复合转子两部分的合理配合,即合成的 X_d 、 X_d/X_q 优化值的求取;磁阻段铁心使用的具有高饱和磁感应强度、高磁导率软磁材料的开发、选择; $X_d > X_q$ 型复合永磁转子同步电机的最优控制。

(收稿日期:1994-10-24)

ANALYSES OF RAISING SPEED BY WEAKENING FIELD OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

【Abstract】 It introduces the principle of raising speed by weakening field of permanent magnet synchronous motor, and review the method and reasearch achievement. The paper points out it is the best choice to solve the problem thoroughly that to combine optimized control method with compound constructure of PM rotor, and puts forth difficulties to be comeover for the new structure.

【Keywords】 permanent magnet electrical machine, synchronous motor, adjusting speed by weakening field, compound PM rotor, analyze