

感应电动机平滑调速的展望*

疏松桂

(中国科学院自动化研究所)

1 引言

感应电动机构造简单, 成本低廉, 运行可靠, 维护容易, 直接使用交流电源, 所以在工业中用途很广. 但是它的调速性能差, 以致在自动电力拖动中, 还多采用直流电动机.

近几年来, 科学技术先进的国家, 特别是苏联, 在感应电动机平滑调速方面的研究, 颇有成果, 表明这种交流电动机的调速大有发展的前途. 也就是说在自动电力拖动中, 简单牢固价廉物美的感应电动机; 仍有逐渐代替直流电动机的可能.

现在先来举出所有感应电动机各种平滑调速的方案, 然后讨论各种方案的内容, 主要优缺点及其改进与发展的途径, 最后统一比较各种方案的长短, 并推论出平滑调速的总趋势, 以便从事更进一步的研究与推广应用于未来. 感应电动机平滑调速的方法计有下列七种:

1.1 转子电阻调速

引用电阻于转子电路中, 均匀改变电阻, 则可得到平滑调速, 但是转子铜耗加大, 效率低不经济, 且不能得到广阔的调速范围, 所以此法应用很小, 然在启动时则常用以限制电流与提高启动转矩.

1.2 变电压调速

感应电动机的电磁转矩与端电压平方成正比. 因此改变端电压也就改变了电动机的机械特性, 所以能够控制电动机的转速. 这个方法的缺点与转子电阻法相同, 因此除启动外不常应用.

1.3 变频调速

逐渐改变电源频率, 即是改变定子旋转磁场的转速, 于是转子转速也随之改变, 这是一个根本的办法.

1.4 双馈电调速

引入可控频率的附加电势于转子电路中, 调节这个附加电势的大小与频率, 则可控制电动机的转速.

1.5 饱和电抗器调速

* 《自动化》, 第1卷第1期, 1958年.

将饱和电抗器接入定子或转子电路中,用直接控制其饱和度也就是改变交流电路中的电抗.于是改变了交流电压降得到电机转速的控制.当饱和电抗器接入定子时,实质上就是变电压调速法的一种.

1.6 脉冲调速

周期性地改变电动机的运行状态(例如将电源接通与断开),则转速也要随之改变.改变脉冲规律,就可控制电机的平均转速.

1.7 不平衡状态调速

加不平衡电压于定子上或改变电动机本身的电路为不平衡状态,可得到特殊形状的机械特性,逐渐改变不平衡度,则得到电机的平滑调速.

上例 1.1, 1.4 二法限于绕线式感应电动机,很早就已采用.因为缺点显著,所以迄今尚未能推广应用于调速拖动中.其余五种方法用于绕线式或鼠笼式电动机均可.这里 1.3、1.5、1.6 三法发展较晚,仍在研究改进之中.总之,转子电阻及变电压两种方法,主要是用于启动,在调速方面可以肯定没有什么发展前途,以后不再单独提出讨论.其他五种平滑调速方法,分别简明叙述如下,以便归总推求最后的结论.

2 变频调速

感应电动机转子铜耗等于滑差乘通过空气隙的功率,所以一切借改变滑差而调速的方法(包括前节所举的除变频调速外其他各种方法)效率都不会高,变频调速不是改变滑差而是改变定子旋转磁场的转速,这样不致增加转子铜耗,就效率而言为一最适当的方法.

在变频调速中,电压与频率间须要维持一定的关系,才能得到合适的运行特性.如果忽略定子阻抗不计,则定子输入电压 V 的大小等于定子感应电势,但定子感应电势与空气隙磁通 ϕ 及定子频率 f_1 之乘积成正比,所以 $V \sim \phi f_1$,又在相对滑差不变时电磁转矩 M 与 ϕ^2 成正比,于是 $V \sim f_1 \sqrt{M}$. 因此选择电压频率变化的规律有下列两个方案:

1. 在恒转矩调速时, $V \sim f_1$.
2. 在恒功率调速时(即 $f_1 M$ 几乎不变), $V \sim \sqrt{f}$.

在实际运行中,定子阻抗是不可忽略的,这样上述两个方案就不能维持优良的运行性能,即是在低频时运转特性显著地恶化.因此在频率调速应用中,须要有更合理的电压与频率变化的规律.由自动调整装置之助可以得到电压随频率及负载依给定的规律而变化.

至于如何获得可变频率的电源,虽然旋转变频机组已经得到了实际的应用,但所用旋转机组本身亦有平滑调速问题(这种调速往往由直流电机或直流发电机电动机组来实现),以致整个变频机组的设备容量将等于被调速电机容量的 2—4 倍.因此变频调速原有的优越性被抵消了很多,所以应用大受限制.只有进一步改变变频机的结构,简化机组,减小设备容量,或采用离子式变频器等办法,才好推广应用这种变频调速的方法.近几年来,苏联学者对于变频电源问题已经作了多方面的研究,例如整流子式变频装置、接触式变频装

置、机械式变频装置、正交磁场变频器、离子式变频装置等*都在大力研究中,并已得到了相当的成果.

3 双馈电调速

将感应电机的定子绕组接到工频电源上,同时引入可控频率的附加电势于转子中(通过滑环到绕组)即得双馈电感应电机的运转.如果附加电势足够大时,则成同步感应电机运行的情况.这时转子内由于附加电势所产生的旋转磁场同步追随定子旋转磁场而旋转,也就是滑差频率与附加电势的频率一致,于是调节附加电势的频率,就能控制电机的转速.在附加电势的大小一定时,电机的功率因数要随滑差而改变.如果转速控制到相当高时,不但功率因数变坏,还会使电机失去同步,变成非同步运行,这时滑差频率与附加电势的频率不同,于是附加电势的电流不但扰动电机的运行,而且经过定子感应到电网中去,对于整个电力系统都不利.又如果最初加进的附加电势不够大,不能使电机牵入同步,这也变成非同步运行.在理想的运行时,附加电势的大小应该随频率成一定规律的变化,不仅要使电机不失去同步,还须调节功率因数时刻保持最合理的数值(等于 1,甚至于使电流超前成同步电容机运行,以便改善电网的功率因数).

双馈电感应机可以得到双区调速,当附加电势的频率减小到零时,即成直流励磁(这时转子绕组的接法当然也要改成单相),电机达到同步转速,其运行情况与普通同步电机一样.然后慢慢改变附加电势的频率到反转相序,则电机运转到高于同步转速,这时电能从附加电源输进转子,恰与在低于同步速度运转的情形相反,那时电能由转子输出到附加电势电路中去.在高于同步速时,机械负荷功率由定子及转子两方面供给,因此可以超过普通感应机的额定容量,不致过热.但是低于同步速运行时,情形相反,定子的输入除供给机械负荷外还要供给滑环的输出,这样电机当然不能达到额定负载.

至于附加电势的频率与电压间之准确变化规律,频率与电压分别对于功率因数的影响,及牵入同步与失去同步的力矩等等运行特性,都是电机参数的函数,应有待于进一步的研讨及实验的证明,其进行的途径可以仿前人对于同步电动机的研究.

双馈电调速与前节所谈的变频调速比较起来各有优劣.双馈电法是属于利用改变滑差来调速,因为转子铜耗等于滑差与通过空气隙功率的乘积,所以在低速时效率比变频调速法要低,又双馈电法限用于绕线电机而变频法亦可用于鼠笼式电机.但双馈电调速所需附加电势变频设备的容量,只是滑环的输出或输入的功率,而负载的功率还是全部(低于同步速运行时)或部分(高于同步速运行时)由电网通过定子来供给,因此双馈电法变频设备的容量在实际调速范围内,(滑差的绝对值小于 1 时)比变频调速时要小.

附加电势电源,可由变频机组供给,如整流子式变频器、旋转变流机、同步变频设备、补偿整流子电机及离子变频设备等,其中离子变频为近年来发展的新设备,并已应用于双馈电感应机,颇有发展前途.其他各种方法虽然发现很早,但以机组复杂,成本较高,迄今尚未得到广泛的应用.此外还有三相交流整流子调速电动机,其运行原理与双馈电感应电

* 根据 1957 年中国科学院赴苏联考察团自动化组的报告.

机同,但附加电势直接取得于电机本身,不需要另外机组来供给,所以设备费减低,解决了成本问题,可惜仍有整流的困难,且调速范围有限,以致未能推广应用(在苏联应用很少,但捷克用得很多).

4 饱和电抗器调速

前面引言中已经指出,将饱和电抗器接入定子内来控制感应电动机的转速,实质上就是一种变电压调速法,一般转子电阻不大的感应电动机在稳定范围内运转时(转矩由零到最大值),转速与电压的关系很小.所以变电压调速法通常调速范围都不会很大.因此应用饱和电抗器调速时,一定要采用高电阻转子感应电动机,或者设法使电机能够在机械特性不稳定的区域内运行(转速由零到最大转矩的区域内),才可以提高调速范围.当饱和电抗器接入转子时,由感应电动机近似等值回路可以看出其效用与饱和电抗器在定子中的情形相同.

饱和电抗器控制感应电动机的系统可以分为开周及闭周两种,开周控制系统通常只能在稳定区域内运行.所以需要采用高电阻转子感应电动机,才可以得到较大的调速范围.普通启动转矩大的鼠笼式电机在低速时具有较高的转子电阻,绕线式电机可以外加转子电阻,这些感应电动机,都能够采用开周控制系统.又这种开周控制系统对于负载转矩随转速而增加的拖动装置(如通风机等)比较适用,因为这里可以使电动机运行在机械特性不稳定的区域内,于是不必要采用高电阻转子感应电动机而可以增大调速范围.

虽然如此,开周控制系统还是使用得很少,因为机械特性差,远不如闭周系统运行准确可靠.引用闭周控制系统,不但可以增大调速范围并且能够提高机械特性刚度.所以在饱和电抗器调速中多采用之.闭周控制系统的反馈方法一般是用转速负反馈,即是将测速发电机的电压(直流或交流都可以)与参考电压比较再经过放大器来控制饱和电抗器的饱和度,借以完成调速的任务.另有一种桥式反馈系统,利用定子一相等值阻抗(是转速的函数)作为桥的一臂,再将桥上不平衡电压反馈到饱和电抗器控制回路中,这样就得到间接速度反馈的效果.此外电流电压反馈系统也已得到应用.这种系统与桥式系统都不需用测速发电机,所以特别适用于小容量电机,例如实心转子感应电动机等.

不管是那一种饱和电抗器控制系统,在负载转矩小于某一定值时(相当于控制电流等于零时的电机转矩),都有一个不可控制的区域.为了消除这个区域可以另加一套反向饱和电抗器,或利用双定子绕组感应电动机,以便在负载转矩很小时产生一种反向转矩来消除那个不可控制的区域.此外还可以在低负载时加上一种直流激磁,借以产生制动转矩来消除不可控制的区域.

饱和电抗器应用于感应电动机的调速,历史还不很长(近十年来的事),但已得到相当的重视.这种调整方法的优点是平滑可靠,调速范围相当大(可以到 30:1,甚至于再大到 50:1)不需用直流或变频电源,比用直流电机及前两节所举的两种感应电机调整法都要方便,但是它的主要缺点是在靠变电压而调速,低速时电流大容易过热,效率很差,而且饱和电抗器的重量相当大(约为电机本身重量的 45%左右),不便配用大型电机.因此这种控制方法仍有待于进一步的研究与改善,才有希望加以推广应用.

5 脉冲调速

脉冲调速方法很简单, 只须将正常电压变成脉冲式加到感应电动机定子绕组中, 于是控制相对接通时间(接通时间与脉冲周期之比), 即可调节电机的转速. 脉冲之获得是在主电路中接入接触器开关, 再控制开关的动作, 即得电机的脉冲输入.

控制脉冲的方法有开周及闭周两种. 开周控制是最简单的形式, 通常是用延时继电器的组合来开闭主电路中的开关. 于是调整延时继电器的动作时间, 即可控制感应电动机的转速. 这种方法虽然简单, 但以机械特性的刚度较差, 再加上其他缺点(如调速范围小, 低速时电流冲击大), 所以不常使用.

闭周控制是用转速或其他量来控制开关的动作. 如系转速控制系统, 调速测速发电机回路中电阻的大小, 即可调速电动机的转速, 这种方法比开周控制系统好, 不但可以得到刚度较大的机械特性, 而且能够达到很大的调速范围(到 1500:1), 所以脉冲控制实际上都是采用闭周系统. 在苏联已应用到 155 千瓦绕线式感应电动机的调速.

脉冲控制的主要优点是简单准确, 动作快, 调速范围宽; 其缺点是转速有脉冲, 不适合于要求转速恒定的工作机械. 脉冲控制唯一的困难是受主电路中接触器上通过电流和动作频率的限制, 尚不能用于大功率电机. 为了克服这个困难, 今后研究的方向应该向大功率无触点开关方面探讨, 如磁性无触点开关及离子无触点开关等设备都可以作为研究的对象. 此外减低开关动作频率与加大动作速度等问题都是值得进一步的研究.

6 不平衡状态调速

以上所举的各种调速方法都是属于平衡状态, 即是各相的电压电流及参数都是对称的. 本节专门讨论不平衡状态调速问题. 如果我们加于定子上以不平衡的电压或插入转子内以不平衡的阻抗, 则可得到不平衡状态的调速. 不平衡调速可以应用于平滑调速及不平滑调速两种拖动. 以下只谈平滑调速的应用. 这种调速的实现是赖控制不平衡度而获得. 其原理及特性都可以引用对称分量法而分析之. 至于怎样得到不平衡电源及阻抗略述于后:

6.1 定子不平衡电压

不平衡电压获得的方法很多, 常用于感应电动机平滑调速者用三: (a) 将一个单相自耦变压器的原边接到三相电源中之二线, 其副边与电机定子绕组之两端相连, 再将电机绕组的第三端直接接到电源之第三线, 于是调整变压器的匝数比例, 即是调整电机端电压的不平衡度, 也就是调整电机的转速. (b) 在电源与定子间接入不平衡阻抗, 亦可得到与(a)条同样的效果. 最简单常用的方法, 只须接入一个单相饱和电抗器即可, 并可用转速反馈来控制饱和电抗器, 以便加强机械特性的刚度. (c) 用特殊方式将定子三相绕组接到单相电源, 也可以得到三相不平衡电压. 例如将定子二端直接连上单相电源, 其中一端串联固定电容及可变电抗再接至第三端, 这样可以得到不可反转的调速. 如用对称接法(即是接至电源的定子二端各自绕过电容及可变电抗后共同接到第三端), 则可用于正反转调速.

在实际应用中再加上转速反馈,以便提高机械特性刚度,这里所举的三种方法都已得到应用。(a)法通常是用触点控制,所以不能得到很平滑的调速,其余二法是采用无触点控制,调速的平滑性很高。

以上所述三种不平衡电压,都没有零序电压,也没有零序电流,其运转特性经过对称分量法的分析,可以知道等于两个同轴感应机所组成的机组。这两个假想的电机与原来真实的电机完全一样,但所加的电压一为原来不平滑电压的顺序分量,一为逆序分量,二者所产生的转矩方向相反,电动机自然是随大分量转矩的方向而旋转。调整电压不平衡度即是调整两个分量的比值,就可以调整转速。

6.2 转子内插入不平衡阻抗

将感应电动机定子上加以平衡电压,同时在转子中接入不平衡阻抗,于是转子内就产生不平衡电流。顺序电流与正常运行感应电机转子电流相同,对于定子不起扰乱作用;但逆序电流反回到定子感应出频率为 $(1-2S)f_1$ (其中 S =滑差, f_1 =电源频率)的电势及电流,其相序与电源相序相反,这样定子及转子都产生顺序与逆序旋转磁场,于是两个顺序磁场相互作用产生一个转矩,两个逆序磁场相互作用产生另外一个转矩,此外顺序与逆序旋转磁场产生两个脉冲转矩(时间上是脉动),其平衡值为零,不致影响电机的机械特性。因此这样运转的感应电动机还是等于两个同轴电动机,其构造与原电机完全相同,顺序电机之运转与正常电机一样,但逆序电机却在转子上加以逆序电压,而定子则短路之。

这种方法虽然比平衡转子电阻法要节省一部分外接电阻及接触器,并可以得到较平滑的调速,但是最大转矩较小,效率降低,所以不适合于容量较大的感应电机调速之用。

7 结 论

总括前面所述,可以归纳出来下列八条结论(不包括转子电阻及变电压两个调速方法)

1. 变频调速及双馈电调速的理想调速范围没有上下界限。实际上受了机械强度及变频设备等限制,也不能得到很大的调速范围,尤其是在采用整流子变频设备时,频率不可过高,所以调速范围限制得愈狭。其他方法都只能在同步速以下调速,范围大小不同,现以脉冲法为最大(可到1500:1)。

2. 不平衡状态调速的平滑性与不平衡阻抗的调节或不平衡电压的获得之方法有关。脉冲调速时虽有脉动,但平滑性并不差、其他三种方法(即变频调速,双馈电调速及饱和电抗器调速)的平滑性都很好。

3. 为了提高电机的机械特性刚度,各种调速方法都趋向采用闭周控制系统,特别是饱和电抗器调速及脉冲调速二法,目前差不多已不用开周控制系统了。

4. 饱和电抗器调速控制系统(包括平衡及不平衡状态)的过渡过程较慢,其他调速方法的过渡过程都较快。

5. 只有变频调速法不是利用改变滑差而调速,所以在低速时转子铜耗较小,效率较高。其他调速方法都是利用改变滑差来调速,转子铜耗随滑差而增大,因此在低速时铜耗较大,效率较低。

6. 除采用离子变频设备外,变频调速及双馈电调速都需要一套变频机组,所以起始投资很高,其他方法无需变频电源,则设备费较低.

7. 饱和电抗器调速,脉冲调速及不平衡状态调速三法在目前都还只限于较小型电机.至于变频调速及双馈电调速二法则不拘电机大小都可适用.电机充分利用率则以双馈电调速法较高,在其他方法中都随调速范围之增大而减小.

8. 前面分节讨论的五种平滑调速方法中,除不平衡状态一法外,都有不同程度的发展前途,其中尤以变频调速有着光明的前景.这个方法不但是调速性能最合理,而且也有很大发展的可能,因为变频电源可以从多方面探讨获得,离子变频更是大有希望.这样一来不但能够解决感应电动机的调速问题,而且可以控制同步电动机,并且可以向变频电动机方面发展.双馈电调速法本以设备费高不能推广,但现在与变频调速法又有联系.如果变频电源能够圆满解决(指经济方面),则双馈电调速法仍将很有前途.尤以离子变频电源更适合馈电于转子.饱和电抗器及脉冲调速都趋向于闭路控制并在推广应用之中,而脉冲调速可以建议向无接触点开关发展,庶可消除接触点开关之困难.

为了便于参考起见,按电机调速的基本指标将前述感应电动机五种重要平滑调速方法的简单调速性能及其发展的新趋势表列于下:

基本指标	变频调速	双馈电调速	饱和电抗器调速	脉冲调速	不平衡状态调速
调速范围	理想上无限制,实际上并不太大	同前	开周小,闭周大(可到 50:1)	开周小,闭周大(可到 1500:1)	视所用方法而异
转速调节领域	双区调速	双区调速	同步速以下	同步速以下	同步速以下
调速平滑性	好	好	好	好	视所用方法而异
机械特性刚度(稳定性)	好	好	开周差,闭周好	开周差,闭周好	视所用方法而异
调节转速时的容许负荷	恒功率或恒转矩均可	恒功率或恒转矩均可	开周-恒转矩 闭周-不同负荷	开周-恒转矩 闭周-不同负荷	视所用方法而异
过渡过程(电的)	快	快	较慢	快	视所用方法而异
效率	高	中	低	低	低
起始投资(设备费)	高	高	中	低	低
电机容量	不拘	不拘	中小型	中小型	中小型
发展前途及方向	变频电源的研究,特别是离子型频的应用	同前	闭周控制	闭周控制及无触点开关的应用	应用范围较狭,发展前途不大

执笔者注 本文原作为中国科学院自动化研究所电力拖动组一部分同志(包括范鸣世、鲍百容、郑秉刚、钟津立、万嘉芝等)所写综述报告“感应电动机调速综述”一文总结之用,因为综述尚未完卷,且过于冗长,不能也不便于短期内发表,所以先抽出这一总结部分发表于此,希望得到海内专家及读者们的指正,以便修改及补充综述原文.

参考文献部分将详列于综述原文,此处省略.

本文承沈尚贤先生校改一遍,特此致谢.