

## 变频驱动节能新途径——优化励磁控制

沈立民

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,杭州 310023)

**摘要:**对于泵和风机类驱动系统,在低速运行时不需要提供全额转矩。通过励磁优化控制可以降低电动机能耗,减少电能浪费。励磁优化控制是通过控制电动机励磁电流来确定变频器的输出电压,从而尽可能地使电动机的效率能够达到最高值。通过理论分析和实验测试,论述了一个4 kW变频调速系统通过励磁优化控制使得电动机的运行效率,较之原来基本的V/f控制有了明显的提高。

**关键词:**节能;变频调速;优化励磁

**中图分类号:** TM343.2;TP273

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2008)04-0254-06

## New way of saving energy : Inverter drives with optimum excitation control

SHEN Li-min

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** As the application is a fan or a pump, full torque is not required at low speed. Energy loss of motor is suppressed by optimum excitation control. Optimum excitation control is a control method that controls the excitation current of the motor and determines the output voltage of the inverter so that the motor efficiency is the maximum possible. The results showed that the efficiency of a 4 kW inverter drive system can be improved, compared to the conventional V/f control method, by using optimum excitation control.

**Key words:** saving energy; inverter drives; optimum excitation

全球能源日益短缺,电价经过短暂的稳定之后,近期又开始明显上升。因此,作为对节能新途径的一种探索,即如何使先进的仪器设备能在运行使用过程中尽可能地节省电能的消耗,变得越来越紧迫和现实。对此,可调速驱动可以做出巨大贡献。如果从设备整个使用生命期来进行考察,由于存在不少不正确或不恰当的使用情况,因此还存在着大量

节能的可能。

目前在市场上出现了对异步电动机进行驱动的变频器具有优化励磁的新型控制方法及参数设定功能。通过这种方法能够优化所需电流和功率的大小,从而达到减小能耗的目的。据统计,由于用于驱动的电能有2/3都消耗在了泵和风机类驱动系统中,所以在这类驱动领域中应用磁场优化控制尤

为有益,当然并不排斥其他应用领域。

本文首先介绍了这一优化方式的理论基础,接着阐述了相应的驱动系统,包括驱动设备及电源,最后对这一节能方法进行了效果测定。由于大部分驱动系统功率在  $0.75 \sim 7.5 \text{ kW}$  之间,所以着重针对这一范围的情况来进行研究。

## 1 泵类异步电动机驱动系统

图1(a)所示为风机和泵类驱动系统根据离心原理所得的理论特性曲线。统计调查不断显示,大部分驱动泵和风机的三相异步电动机还是转速不可调地运行在接近同步转速的某个固定转速上,使用中总流量“简单”地通过阀门的开度控制来进行调节,即控制其“关”、“部分关”或“全开”,而在此过程中驱动电动机以较高的功率不停地从电网吸收能量。事实上,要减小流量(比如  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ )可以用变频器驱动通过降低转速(运行状态从  $N$  移至  $P$ ),代替用阀门控制(在特性曲线1上从  $N$  移至  $P'$ )来实现,这样可以获取  $FD$  面积对应的能量节省。对于阀门全开情况的工作状态将移至  $P'$ ,相应的能量损失为  $FB$  对应的面积。

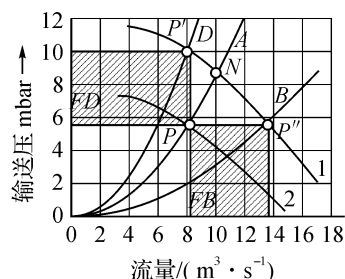
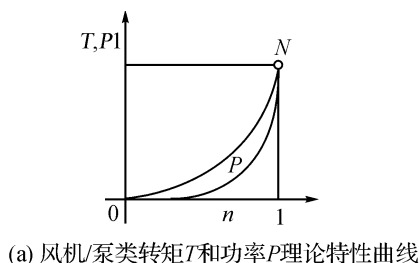


图1 泵类特性曲线

Fig.1 Characteristic curve for pump

通过调节转速可以在风机特性曲线  $A$  上找到与所需流量相对应的最佳工作状态。对此,变频驱动特别适用,因为变频驱动除了可以进行转速控制外还可避免经常碰到的起动问题。应用变频器可以避免起动电流的冲击而造成的电网干扰,同时还可

以消除冲击转矩,而冲击转矩会引起诸如传动带打滑等问题。这样的驱动系统对电网和机械设备都是非常友好的<sup>[1]</sup>。通过对变频器特殊运行参数的设定来优化励磁,还可以进一步降低对电网能量的消耗。

## 2 变频器与异步电机

### 2.1 电动机变频调速原理

为了使电动机能够输出额定转矩,必须给它最佳的励磁。根据矢量关系,转矩

$$T \sim \Psi \times i \quad (1)$$

式(1)中: $\Psi$ 是磁通, $i$ 是电机电流。对于一定的转矩,磁通 $\Psi$ 越大,所需的电流 $i$ 就越小。但是磁场工作点“ $\Psi$ ”不是可以任意地自由选定的,因为铁芯磁场的饱和度是由电机生产成本上的限制决定的,见图2(a),而磁通小了就需要增大 $i$ ,这也就增大了绕组损耗( $I^2 R$ ),所以一般把磁场工作点确定在接近磁饱和临界点“ $A$ ”处。

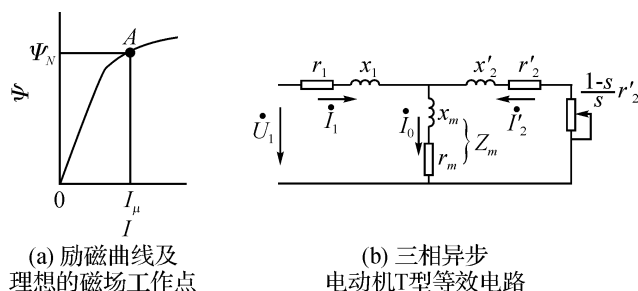


图2 异步电动机

Fig.2 Asynchronous motor

由变频器驱动的异步电动机在运行时通过改变供电频率  $f$  来改变转子转速  $n$ 。同步转速  $n$  由

$$n = 60 f / p \quad (2)$$

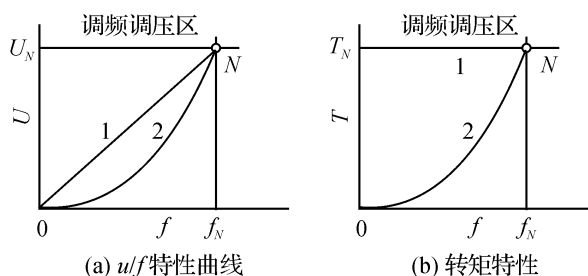
确定,异步电动机转速  $n$  随  $n$  变化,其中  $p$  为电机绕组的极对数。图2(b)所示为异步电动机  $T$  型等效电路。在理想空载工作状态时,电动机的转子回路电流  $I'$  为零,忽略定子绕组铜耗和铁耗,可得由电压  $U_1$  产生的空载电流  $I_\mu$ ,也即是励磁电流  $I_\mu$ 。

$$I_\mu = U_1 / x_m \quad (3)$$

式(3)中: $x_m$ 为励磁感抗。如果为了调节转速而改变频率  $f$ ,那么供电电压  $U_1$  也必须进行调整,以使励磁电流  $I_\mu$  维持不变,从而使得磁通  $\Psi$  保持恒定,即

$$I_\mu \sim U_1 / f = \text{Const} \Rightarrow \Psi = \text{Const} \quad (4)$$

根据这一推断,在低转速范围(调压区域)按照线性  $U/f$  特性曲线“1”运行,如图3(a)所示。如果电流  $i$  不变,可知在低转速区域电动机转矩保持恒定,如图3(b)特性曲线1所示。



1 恒定转矩; 2 风机 / 泵类转矩

图 3 异步电动机  $f \leq f_N$  时的特性曲线

Fig.3 Characteristic curve at  $f \leq f_N$  for asynchronous motor

## 2.2 电动机负载工作状态

各种工作设备具有不同的转速转矩  $n$ - $T$  机械特性。图 1a 所示为离心泵和风机的特性曲线,其转矩

$$T \sim n^2 \quad (5)$$

假设不考虑起动(静止摩擦)转矩,从静止状态开始时的负载转矩值很小。为了取得与这个较小的所需转矩最佳的匹配,可以把所需转矩近似地当作磁通来进行分析。由此,根据式(1)~(5)可得,在低转速区域(额定值以下)可以大幅减小电动机电压,使其不是线性地而是随着频率(转速)的平方进行变化,如图 3(a) 中特性曲线 2 所示,也可把它看作是节能特性曲线,因为此举可以减少电动机损耗。与此同时必须考虑的是,由于电压降低也即磁通降低会改变转矩特性曲线(如图 3(b)“2”所示),转矩

$$T \sim U^2 \quad (6)$$

由于电压下降使得电动机的特性曲线也与正常励磁情况时不同,如图 4 所示。把加在图中的风机特性曲线与不同频率时电动机特性曲线的交点作为工作点,从中可见,在电动机过载能力几乎保持不变的同时,其特性曲线却变得越来越平坦,这意味着运行时较小的负载变化会导致较大的转速波动。

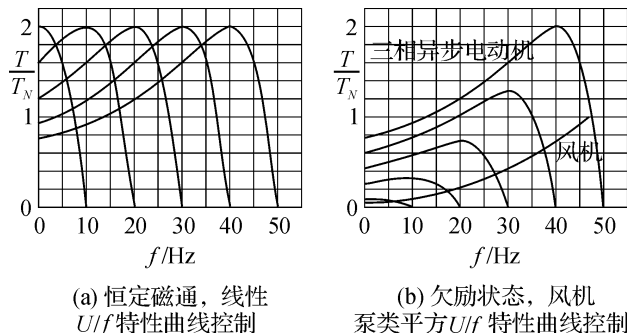


图 4 电动机不同工作频率时的特性曲线

Fig.4 Characteristic curve for asynchronous motor at different frequency

## 2.3 损耗

在此对异步电动机的损耗作进一步讨论,图 2b 所示的 T 型等效电路图中包括铁耗电阻  $R_{Fe}$ 、定子和转子电阻  $R$  及  $R_r$ 。铁耗  $P_{Fe}$  与电压的平方成正比,绕组上的损耗  $P_{Cu}$ (即铜耗)则取决于定子或转子电流平方的大小,其关系如下:

$$P_{Fe} \sim U^2 \quad (7)$$

$$P_{Cu} \sim I^2 \quad (8)$$

综上所述,可以通过降低电压来使相应的磁通和电流减小,从而达到减少电动机损耗的目的。

## 2.4 励磁与铁耗

图 5(a) 为异步电动机各种类型的损耗在不同负载时的占比状况。从中分析可知,通过降低电压可减小的铁耗部分在从空载到将近一半额定负载的范围里占总损耗的主要份额,而随着负载的增大,电流流过绕组电阻产生的铜耗逐渐取代铁耗占到最大比例,满载时绕组中的电流热损耗(铜耗  $I^2 R$ )超过了铁芯中的励磁损耗。图 5(b) 是不同功率电动机在各自额定功率时各类损耗的分配情况,从图中可以看到,各种损耗的比例随着额定功率的不同而改变,铁耗所占的比例随着电动机功率的增大而增加,在铁耗比例增加的同时,铜耗所占的比例在减小。

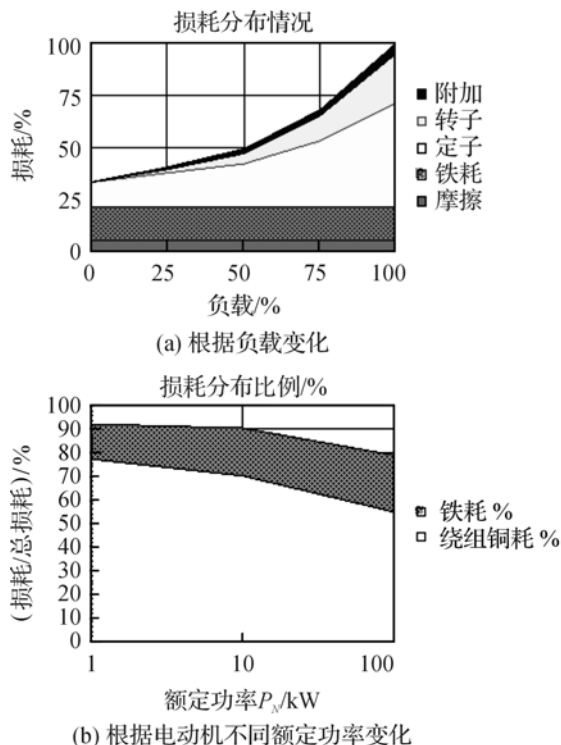


图 5 异步电动机 ( $P = 2.2 \text{ kW}$ ,  $p = 4$ ) 能量损耗分布<sup>[2-3]</sup>

Fig.5 Energy loss distributing of asynchronous motor ( $P = 2.2 \text{ kW}$ ,  $p = 4$ )

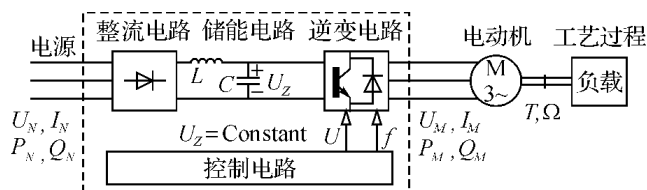
功率为  $0.75 \sim 7.5 \text{ kW}$  的电动机占据了绝大部分市场份额,由于其主要的2种损耗——铁耗和铜耗之和超过了电动机总损耗的90%,为此在下面仅对它们做进一步分析。

## 2.5 欠励运行

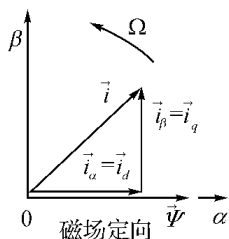
如果降低电动机的工作电压  $U_1$ ,使其低于由  $U/f$  特性曲线确定的电压值,运行在欠励工作状态,那么将减小励磁电流  $I_b$ ,从而使损耗下降,电动机相应的有效功率得到提升,这将节约设备的运行能耗。但同时要考虑到,由于电压的下降使得电动机的特性曲线发生了改变,这点已在图4中表示。

## 2.6 变频器

变频器作为三相异步电动机的调速控制设备得到了广泛的应用。通过一个不可控的电源整流电路给中间储能电容  $C$  充电,电抗器  $L$  可延长电流的充电时间,以此来减小电网中的电流尖峰。电机侧输出逆变器从中间储能电路获取电能,经过控制变换后作为给电机提供频率和电压可变的电源,而频率和电压是由与生产过程相适应的  $U/f$  特性曲线决定的,如图6(a)所示。



(a) 电气框图



(b) 定子电流分解为励磁电流分量  $\vec{i}_d$  和转矩电流分量  $\vec{i}_q$

图6 电压型变频器

Fig.6 VVVF inverter

在电机处于电动机运行状态时,变频器功率单元从电网吸收有功功率( $P_N$ )经过变换后输送给电动机( $P_M$ ),并由电动机进一步转换成机械能( $T, \Omega$ )给生产过程,异步电动机所需的励磁无功功率( $Q_M$ )在中间储能电容  $C$  和电动机之间不断转换。电网侧无功功率( $Q_N$ )很小,它是由中间储能电路中的电抗器  $L$  引起的,电抗器  $L$  可以延长电流通过的时间,减小电流峰值,从而也使电网电流和电动机中的电流不相同,具体参见下面的测试结果。

异步电动机只有一个定子电流  $i_1$ ,但可以运用控制算法,经过解耦、坐标变换后把它分解成彼此互成  $90^\circ$ ,互不影响的无功电流和有功电流2个分量,也即励磁电流分量  $i_d$  和转矩电流分量  $i_q$ ,此即为矢量控制,如图6(b)所示。对2个分量可以分别加以独立控制,达到和直流电机独立控制电枢电流和励磁电流同样的效果,这样就可以单独减小励磁电流,达到减小损耗的目的。

## 2.7 节能型变频器电动机驱动系统

在异步电动机由变频器驱动的情况下,调节转速时电压是按照  $U/f$  特性曲线随着频率的减小而下降。正弦波脉宽调制方式(SPWM)使产生的电流非常接近正弦波,谐波可以忽略不计。

为了在实际应用中了解和掌握新的节能可能性,笔者对市场上畅销的一款具有节能功能的西门子新型变频器 SINAMICS - G120D 在实验室进行了测试,它的主要功能参数 P1300 的设置具有针对不同负载的相应节能控制方式,仅列举与本文讨论相关的如下:

P1300 = 0: 标准的线性  $U/f$  控制方式;

P1300 = 1: 带磁通电流控制(FCC)的  $U/f$  控制方式;

P1300 = 2: 平方  $U/f$  节能控制方式。

尽管 FCC 控制主要是可以提高驱动系统的动态响应<sup>[4]</sup>,但是在电动机轻载且运行在额定频率以下时,利用 FCC 还可以减小电动机的损耗,从而使其取得较佳的运行效率,这也为使用者提供了新的节能途径。它的作用将在下面的实验测试结果中得到证实。

## 3 实验测试

在此将对上述各种控制方式的不同作用利用实验室一台4极4kW电动机(Siemens DUM 2550 - 2/4 B3 JP21)来进行实际测试。由于绝大多数实际使用的电动机的功率在  $0.75 \sim 7.5 \text{ kW}$  之间<sup>[5]</sup>,而这台电动机4kW的功率正好处于这范围的中间,因此对它的测试结果具有很好的代表性。

### 3.1 电动机运行特性曲线

图7(a)所示为线性  $U/f$  特性曲线控制(P1300 = 0)和平方  $U/f$  特性曲线控制(P1300 = 2)以及带 FCC 的  $U/f$  控制方式(P1300 = 1)。图7(b)所示为对应的“励磁电流”,从中可以明显地看到电动机电流大大下降。图7(c)为负载情况下的电动机电流,

曲线表明,电流的减小只在空载至约 50 % 额定负载情况时发生。

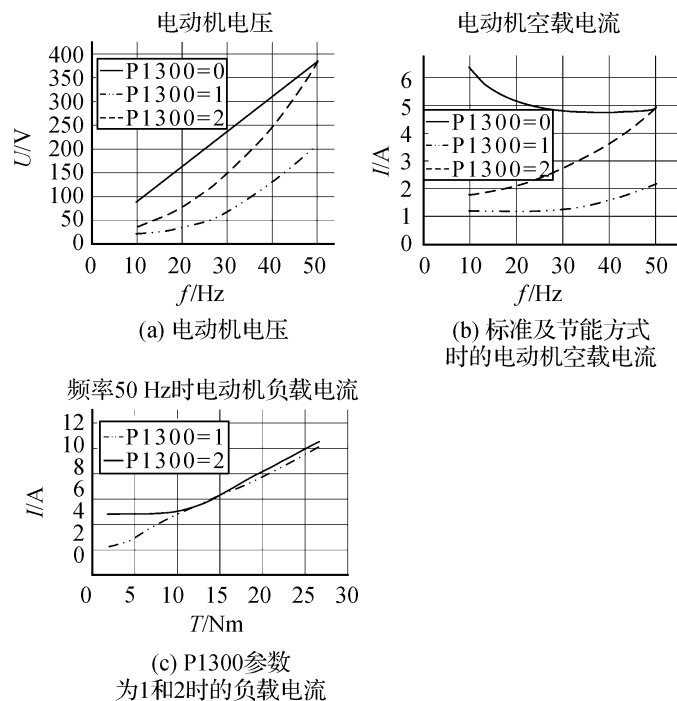


图 7 电动机运行特性曲线

Fig.7 Operation characteristic curve for asynchronous motor

### 3.2 电动机及电源工作参数

图 8 清楚地显示了电源侧和电动机侧也即变频器输入输出端测量值的差别。空载时电源电流接近于零,而此时却有明显的电动机电流,见图 8(a)。

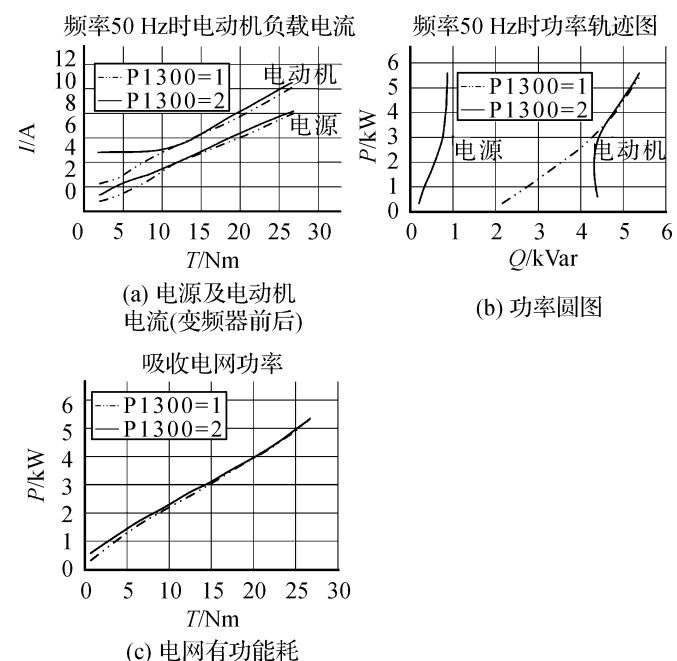


图 8 控制参数为 1 和 2 时的电动机及电源工作参数

Fig.8 Operation characteristic curve for power system and asynchronous motor at parameter "1" and "2"

在这里还可以清楚地看到控制参数的改变对电动机电流会产生明显的作用,而对电源电流影响较小,节省的电动机励磁无功电流正是来自于中间储能电容。图 8(b) 所示为参数变化对功率的影响。相对于电源端无功功率来讲,电动机的无功功率要大得多。把参数设为具有 FCC 功能可以降低电压,从而显著地减小了电动机对无功功率的吸收,当负载增加至大约 50 % 额定值时起的作用就不怎么明显了。不同的参数设定对有功功率的影响如图 8(c) 所示,在此同样可以看到只在空载到约 50 % 额定负载范围有影响。

### 3.3 不同频率时的电动机及电源运行参数

图 9 所示为电动机在不同工作频率下各运行值的变化情况。图 9(a) 给出了电压降低的大小,图 9(b) 为轻载时对电源电流的影响,图 9(c) 为不同频率时的功率轨迹图,控制参数的调整对其影响很小,以至在所示的刻度下基本显示不出。

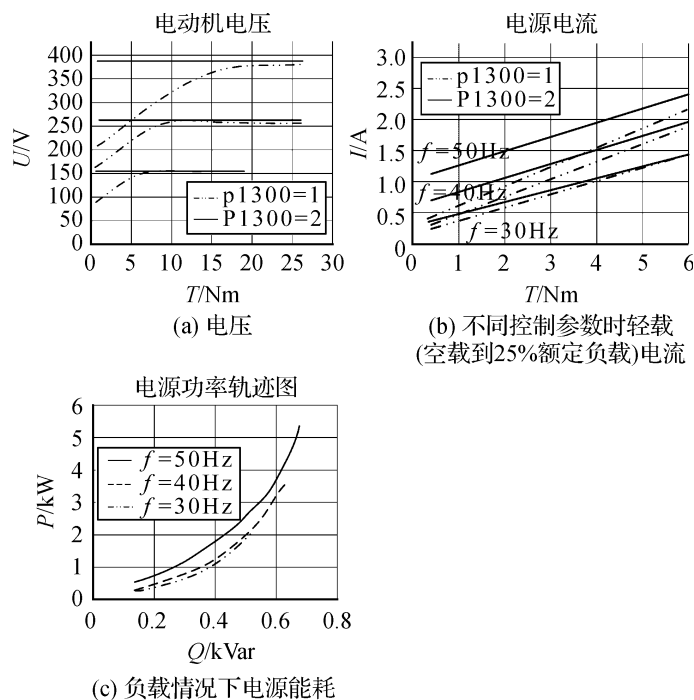


图 9 不同频率时的运行参数

Fig.9 Characteristic curve at different frequency

## 4 节能潜力及应用领域

图 10 所示为驱动系统(变频器和电动机)在参数为“0”、“1”、“2”时总的工作效率,以及参数为“1”时对功率的吸收相对于参数为“2”(风机和泵类标准控制:平方  $U/f$ )时的节能潜力。由于考虑的是整个驱动系统的效率,所以也包括了变频器的损耗(开关频率为 2 kHz)。在空载至约一半额定负载时,由

于有较大的电压减小,因而会有较好的节能效果。铁耗的减小( $\sim U^2$ )和电阻热损耗( $\sim I^2$ :在变频器及电机中的)减小对节省的电能都有贡献。

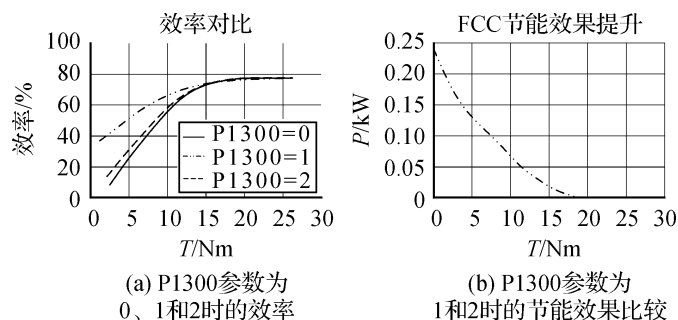


图 10 分析结果

Fig.10 Analysis result

风机和泵类以及那些长期运行在非常轻载的场合的机器设备都是 FCC 节能理想的应用领域。同样的,输送系统也是节能型变频器理想的应用场合,尽管此时电动机的功率或转矩必须按照满负载来进行设计,但是在大多数时候它是运行在严重的欠载情况下,通常小于 50 % 的额定负载。

## 5 结 语

U/f 各种控制方式特定的降压控制,是基于异步电机在恒定供电频率时的准恒速调压节能控制理念,即在保证拖动所需负载的最低转矩要求前提下,降低定子电压,实现减少励磁电流,达到节约铁损、提高效率的目的。利用变频调速技术,通过优化 V/f 曲线设置的变频变压,实现调速节能。通过励磁优化控制,

1) 不仅可以减小电动机对无功功率的吸收,还可以减小电动机电流;

2) 在负载较轻的一定范围内(空载时最显著)可减小电动机对有功功率的吸收;

3) FCC 控制可以在基本变压变频调速节能的基础上额外提升节能效果,4.5 kW 以上容量电机实用价值较为显著;

4) 在某些应用场合,可以适当减小调速系统选配电动机的设计容量;

5) 轻载时功耗的累计额外减小可以极大地节省运行成本。

## 参考文献:

- [1] BROSCH Peter F. Praxis der Drehstromantriebe[M]. Würzburg: Vogel Verlag, 2001.
- [2] GREINER Helmut. Energiesparen mit Getriebemotoren [M]. Offenbach/Main: Danfoss-Druckschrift SD3400, 2000.
- [3] GREINER Helmut. Schutzmaßnahmen bei Drehstrom-Getriebemotoren [M]. Heidelberg: Hüthig Verlag, 2004.
- [4] SIEMENS A G. SINAMICS-G120D FunctionManual [M]. NÜRNBERG GERMANY: SIEMENS AG Automation and Drives, 2007.
- [5] SHEN Limin, BROSCH Peter F. Antriebstechnisches Update "im Maschinenlabor der Zhejiang University of Science and Technology[J]. Konstruktion: 2008(7/8): 56-57.