

研究报告

矿井液压提升机的负载发电运行状态分析

彭佑多¹, 刘繁茂¹, 余兵¹, 贺风华², 胡燕平¹

(1. 湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室, 湖南湘潭 411201;

2. 株洲煤矿机械厂, 湖南株洲 412003)

[摘要] 概要介绍了矿井液压提升机驱动电动机的发电运行工况, 分析了所发电能的主要参数, 计算了发电运行状态反馈给电网的平均功率, 为进一步研究液压提升机的节能特性提供了一定的参考依据。

[关键词] 液压提升机; 负载发电运行; 反馈电能; 平均功率

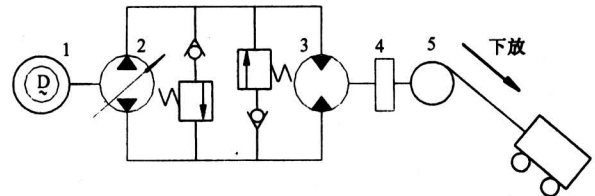
[中图分类号] TD534+.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)12-0097-05

矿山企业是用电大户, 而矿井提升机作为矿山提升物料和人员的大型综合机电设备, 是矿山耗电量最大的设备之一。在矿井提升机一个工作循环, 即提升一下放重物的周期中, 提升机驱动电机(多为鼠笼式异步电动机)的有功功率等物理量呈周期性变化。提升机提升重物是一个耗能过程, 而下放重物则是一个发电制动并向电网反馈电能的过程。无论哪种传动原理的提升机, 在重物匀速下放阶段都能向电网反馈电能, 而在减速阶段, 由于大部分传统机械电控式提升机采用转子切割电阻的方法调速, 下放重物时的动力制动将负载的机械能转变为电能消耗在电阻上, 而且消耗的电能随着提升电动机容量的增大而增大, 故机械电控式提升设备的效率很低, 一般为50%左右。而液压提升机由于液压驱动与液压制动的联锁性, 各阶段速度的实现则都依靠液压驱动系统改变液压泵的排量实现, 在等速、减速阶段都能向电网反馈电能, 这不仅使液压提升机工作平稳, 而一个工作循环中的耗电量也较机械电控式提升机少^[1]。

1 负载发电工况分析^[1-4]

图1所示为液压提升机液压驱动系统示意图, 主要由鼠笼式电动机、变量液压泵、定量液压马

达、减速器、提升滚筒、提升容器等组成。



1—电动机; 2—变量液压泵; 3—定量液压马达;
4—减速器; 5—提升滚筒

图1 液压提升机工作原理

Fig.1 Principle of hydraulic winder

如图2所示, 矿井提升机下放重物过程都由加速、等速、减速、低速爬行和停车休止5个阶段组成。图中 t_0 , t_1 , t_2 , t_3 , t_4 分别对应于加速阶段、等速阶段、减速阶段、低速爬行阶段和停车休止阶段。 a_0 , a_1 分别为加减速阶段对应的加速度, v_0 为匀速运行阶段的速度。液压提升机各阶段运行状态如下。

1.1 启动加速阶段

重物下放开始时, 司机操作液压手柄使液压泵变量柱塞缸向反方向摆动, 给液压马达供油, 实现液压提升机启动, 负载下放。这时液压马达产生的扭矩与负载静力矩方向相同, 负载加速下放。随着

[收稿日期] 2005-08-02; 修回日期 2006-01-11

[基金项目] 湖南省教育厅重点科研项目资助(04A013)

[作者简介] 彭佑多(1965-), 男, 湖南安化县人, 湖南科技大学机械设备健康维护省重点实验室教授, 博士

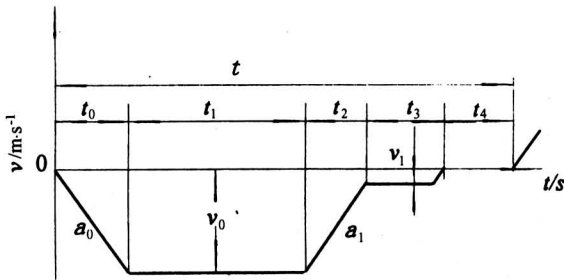


图 2 提升机工作循环速度图
Fig.2 Circular velocity chart of winder

提升容器下降速度逐渐增大，液压马达转速逐渐升高，所产生的驱动力矩逐渐减小。随着转速的进一步升高，当液压马达转速等于液压泵所供液能产生的速度时，液压马达的输出扭矩为 0；而此时电动机处于空载状态（电动机转速 n 等于磁场的同步转速 n_0 ）。现场测试发现，此时电动机有功功率 $P > 0$ ，无功功率 $Q > 0$ ，说明电动机实际上仍处于电动状态，电网继续向电动机输送功率，用于克服各种摩擦和损耗。

1.2 等速阶段

液压提升机在提升负荷的作用下仍加速运转，当液压马达转速超过液压泵供给液压马达液压油所产生的速度时，液压马达的输出力矩变为负值。此时，液压马达变为液压泵的工况，而液压泵变为液压马达工况，拖动驱动电机使之进入发电运行状态，这时电动机的电磁力矩转变为制动力矩。由于电动机的转速 n 已稍大于其磁场同步转速 n_0 ，出现有功功率瞬时停转而无功功率始终 $Q > 0$ ，说明电动机与电网间不存在有功功率的传送，但电网仍向电动机输送无功功率，此时电动机已进入发电状态。当 n 继续升高并达到 $n = 1.02n_0$ 时，出现有功功率反转为无功功率表仍正转，即 $P < 0, Q > 0$ ，说明电动机已向电网输送功率，电动机已完全进入发电状态。此后，驱动电机稳定在 $n = 1.02n_0$ 运转，提升容器以稳定的速度 v_0 运行。

1.3 减速停车阶段

减速时司机将操作手柄逐渐扳回，液压泵变量柱塞缸体摆角逐渐减小，液压泵的排量逐渐减小，输出流量也相应减小，由于这时液压马达为泵工况运转，而液压泵以马达工况带动主油泵电动机运转，所以当主液压泵流量减小，而液压马达在泵工况下反馈来的流量不变时，主液压泵和驱动电机转速也相应加快，使电动机发电运行状态产生的制动

力矩增大。这时整个液压提升系统开始减速运转，随着液压泵排量的继续减小，液压马达继续向油泵反馈压力油。电机继续向电网反馈电能，并产生逐渐增大的制动力矩，使液压马达继续减速。当液压泵在司机操纵下处于零排量状态时，整个系统停止运转，盘形制动器制动，整个提升机停车。

因此，液压提升机下放重物时，在等速下放阶段和减速停车阶段均为液压反馈，电动机发电制动并向电网反馈电能，从而使液压提升机运行平稳，总耗电量少。

在下放重物过程中，液压提升机驱动电机始终只存在一个旋转方向。图 3 所示是液压提升机在一个完整下放重物过程中驱动电动机的工作状态转变。

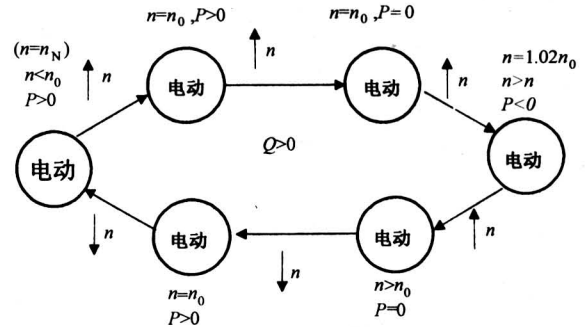


图 3 液压提升机下放重物过程中电机工作状态
Fig.3 Electromotor working state during dropping load of hydraulic winder

2 负载发电运行状态物理量分析^[5-9]

2.1 相序

在液压提升机的一个工作循环中，液压马达旋转速度大小与方向依靠改变液压泵柱塞缸体摆角大小与倾斜方向而实现，因此液压提升机驱动电机的旋转始终只需朝一个方向，即旋转方向与电动运行状态时的旋转方向始终相同，因此，所发电电压与电网同相序。

2.2 转差率 s

转差率是描述异步电动机运行性能的重要参数，由 $s = (n_0 - n) / n_0 = 1 - n / n_0$ ，考虑到电动机在电动、发电和电磁制动 3 种不同状态下运行时， $-\infty \leq s \leq \infty$ ，当异步电动机处在发电运行状态时，由于 $n > n_0$ （一般为 $n = 1.02n_0$ ），所以 $s = (n_0 - n) / n_0 < 0$ 。

2.3 有功功率与无功功率

液压提升机的驱动电机绝大部分为鼠笼式防爆异步电动机, 是典型的电感性负载, 当电源拖动电机旋转时, 有功功率 P 和无功功率 Q 为:

$$\left. \begin{aligned} P &= mVI_R = mVI\cos\varphi \\ Q &= mVI_X = mVI\sin\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 m —相数 (一般 $m = 3$), V —电源相电压, I_R —电流 I 的有功分量, I_X —电流 I 的无功分量, φ — V 与 I 的夹角。

发电运行状态时, 由于 $s < 0$, 所以转子导体切割旋转磁场的方向和 $s > 0$ (电动状态) 时相反, 因而转子感应电势的方向也和 $s > 0$ 时相反, 其转子电流的有功分量亦随之反向。在电网功率为无穷大时, 为使气隙主磁通不变, 转子电流的有功分量的反向将使定子电流有功分量与电压 V 反向。由于 $90^\circ < \varphi < 270^\circ$ 时, $\cos\varphi < 0$, $P < 0$ 而 $Q > 0$, 即无功功率为正而有功功率为负, 说明与电动状态相比, 电能从电动机流向电网, 而电网仍向电动机提供无功功率, 用来满足异步电动机发电运行时励磁的需要和定、转子间漏磁的需要。

电动机发电运行时的有功功率也可表达为:

$$P = T \frac{2\pi n}{60} \quad (2)$$

式中, T 为发电运行时的转矩, $T = \frac{2\lambda T_r}{s_c/s + s/s_c}$ 。

s_c 为临界转率差, $s_c = s(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$, T_r 为额定转矩, $T_r = 9550 P/n_r$, n_r , P 分别为电动机额定转速和额定功率, λ 为电动机过载倍率。

电动机发电运行时仍需从电网汲取滞后的无功功率用来励磁, 这部分功率约为异步电动机额定功率的 $1/5 \sim 1/4$, 这无疑加重了电网无功功率的负担, 降低了电网的功率因数。同时电动机发电运行时会增加线路和电机绕组中的损耗。

2.4 电磁功率 P_M 与转子输出机械功率 P_m

电磁功率为:

$$P_M = mE'_2 I'_2 \cos\varphi'_2 \text{ 或 } P_M = mI'_2 r'_2 / s \quad (3)$$

式中 E'_2 为转子折合电势, I'_2 为转子折合电流, r'_2 为转子折合电阻。

因 E'_2 与 I'_2 的夹角 φ'_2 大于 90° , $s < 0$, 故 $P_M < 0$, 这表明功率由转子侧流向定子侧。

而转子输出机械功率为:

$$P_m = m(I'_2)^2 r'_2 (1 - s) / s \quad (4)$$

因 $s < 0$, 则 $P_m < 0$ 。说明转子不仅不输出机

械功率, 而且尚由液压提升机位能性负载拖动转子旋转, 把机械能输入给电动机, 这些能量一部分消耗在转子上变成转子空耗, 另一部分转给定子变成了电磁功率 P_M 。

2.5 电磁转矩 M

电磁转矩为:

$$M = P_M / \Omega = P_m / \Omega_0 \quad (5)$$

式中 Ω_0 为同步角速度, Ω 为角速度。

因 $P_m < 0$ 和 $P_M < 0$, $\Omega_0 > 0$ 和 $\Omega > 0$, 则 $M < 0$ 。说明发电运行时 M 的作用方向与电动时的转向相反, 此时电磁转矩 M 变成电机制动力矩。

2.6 电压和频率 f

由于液压提升机异步电动机发电运行是由电动状态转化而来, 因此相当于并联在电网上发电运行。与电网并联运行的异步电动机相比, 其转子转速只要稍高于同步转速, 在百分之几的转差率 s 的作用下即可产生额定功率, 因此, 电动机的电压 V 和频率 f 取决于电网的电压和频率。受无穷大电网的强制作用, 使电动机所发电电压与电网相同; 由于异步电动机发电运行时励磁电流由电网所提供, 因此电动机输入电网电流的频率与电网频率相同, 它和自身的转差率无关。可见, 并联发电运行时的液压提升机电机是在定压、定频和变电流的状态工作的。

当然, 电机进入发电运行时, 相当于向电网接入发电机, 而电动机发电运行回到电动状态时, 又相当向电网接入一台电动机, 这将对电网引起磁化电流的冲击, 可能产生过电压等现象。

3 回馈给电网的平均功率计算^[10~11]

在液压提升机下放重物过程中的等速阶段和减速阶段, 驱动电动机均为发电运行状态。笔者以 JKY2/1.5B 液压提升机用于大倾角斜井或立井提升, 以额定工况状态下的参数进行分析与计算。

液压提升机驱动电动机发电运行过程中回馈给电网的平均功率为:

$$P = \frac{1}{t} \eta \int_0^t P_i dt = \frac{2\pi}{60} \eta \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_0+t_1} T_1 n_1 dt + \frac{1}{t_2} \int_{0+t_1}^{t_0+t_1+t_2} T_2 n_2 dt \right] \quad (6)$$

式中 t 为下放工况发电运行时间, 包括匀速运行时间 t_1 和减速运行时间 t_2 ;

P_i 为由下放工况发电运行阶段的负载功率, i

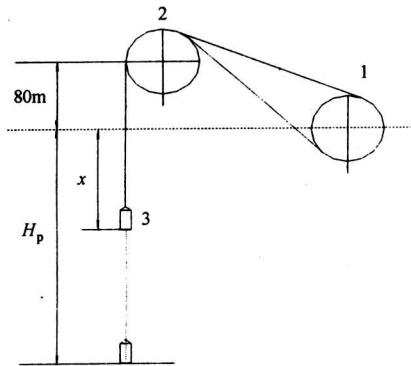
$= 1, 2, P_i = T_i \frac{2\pi n_i}{60}$ (P_1 对应匀速运行阶段, P_2 对应减速运行阶段);

T_i 是下放工况发电运行阶段由位能性负载引起的瞬时力矩, $i = 1, 2, T_1$ 对应匀速运行阶段, T_2 对应减速运行阶段;

n_i 是下放工况发电运行阶段对应的液压马达旋转速度, $i = 1, 2, n_1$ 对应于匀速运行阶段, 此时提升容器以 v_0 匀速下放, n_2 对应于减速运行阶段, 此时提升容器的减速运行加速度为 a_1 , 则 $n_2 = \frac{60(v_0 - a_1 t)}{2\pi R}$, 其中 R 为滚筒半径。根据《煤矿安全规程》, 本文取立井升降物料时情况, 即 $a = 1.0 \text{ m/s}^2$ 。

η 为位能负载—提升卷筒—液压马达—液压泵—驱动电机传动链的总传动效率, 取 $\eta = 0.75$ 。

图 4 所示为提升容器下放工况示意图, 取天轮距井口水平高度为 80 m, H_p 为井口至井底垂直距离。



1—提升滚筒; 2—天轮; 3—提升容器

图 4 提升绳系中钢丝绳各段长度分布

Fig.4 Sect length of hoisting steel rope

提升容器匀速运行阶段位能性负载作用于液压马达的力矩即重力引起静阻力矩为:

$$T_1 = R(kQ + Wx) \quad (7)$$

表 1 JKY2/1.5B 液压提升机主要原始性能参数

Table 1 Main originality parameter of JKY2/1.5B hydraulic winder

R/m	Q/kg	Q _z /kg	G _j /N	H/m	v ₀ /m·s ⁻¹	t ₀ ≈ t ₂ /s	t ₁ /s	P/kg·m ⁻¹	∑ m/kg
1	5 280	1 980	37 310	1 310	3.5	9.8	350	2.648	22 073.6

由 $P = \frac{1}{t} \int_0^t P_i dt = \frac{2\pi}{60} \eta \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_0+t_1} T_1 n_1 dt + \frac{1}{t_2} \int_0^{t_0+t_1+t_2} T_2 n_2 dt \right]$ 计算得到 JKY2/1.5B 液压提升机用于大倾角斜井或立井提升且满载工况下的电机反

馈给电网平均功率 $P = 148.2 \text{ kW}$ 。

可见, 液压提升机下放重物过程中回馈到电网的平均功率与电机额定功率相比较, 由于液压提升机驱动电机在定压、定频和变电流状态下工作,

式中 k 为矿井阻力系数, 罐笼提升取 $k = 1.2, R$ 同前;

x 为下放重物过程中的运行距离, $x \leq H, H$ 为提升高度 (井深);

W 为提升钢丝绳每米质量, Q 为有益荷重。

减速运行阶段位能性负载作用于液压马达的力矩为:

$$T_2 = T_1 + T_g \quad (8)$$

式中 T_g 为减速运行过程中的惯性力矩, $T_g = R \sum ma$

$\sum m$ 为提升各部件到提升滚筒的变位质量。

$$\sum m = \frac{1}{g} (Q + 2Q_z + n_1 WL_h + n_2 qL_q + nG_i + G_j) \quad (9)$$

式中 Q, Q_z 分别为一次提升有益荷重与容器自重;

W, q 分别为提升钢丝绳与平衡尾绳的每米质量;

n_1, n_2 分别为提升钢丝绳与平衡尾绳的数量, 缠绕式提升机取 $n_1 = 2, n_2 = 0$ 。

G_j —液压提升机旋转部件变位重量;

n, G_i 分别为天轮的数量与变位重量; 缠绕式提升 $n = 2, G_i = 152 \text{ kg}$ 。

L_h, L_q 分别为提升主绳与平衡尾绳的长度; $L_q = 0$ 。

$$L_h = H_p + L_x + 6\pi R + 30 + 2n'\pi R \quad (10)$$

H_p —钢丝绳由天轮到井底装载位置的长度, 取额定情况 $H_p = H + 80$;

L_x —钢丝绳由天轮到提升滚筒的长度, 取 $L_x = 28 \text{ m}$;

n' —错绳圈数, 取 $n' = 2 \sim 4$;

对于 JKY2/1.5B 液压提升机的其余各主要原始性能参数如表 1 所示。

能直接将电机发电电能反馈给电网, 显著提高了液压提升机的运行效率和降低运行成本。

4 结语

液压提升机运行各阶段速度的大小都依靠改变液压驱动系统液压泵的排量大小予以实现, 在矿井提升机处于下放重物过程中, 由于提升绳系与承载物等位能性负载的作用, 在等速下放阶段和减速停车阶段均为液压反馈及电动机发电制动运行, 尽管电动机发电运行时仍需从电网汲取滞后的无功功率用来励磁, 加重了电网无功功率的负担, 降低了电网的功率因数。但由于电动机输向电网电流的频率与电网频率相同, 电动机所发电电压与电网电压相同。因此, 液压提升机驱动电动机的发电运行行为为定压、定频和变电流状态, 其发电电能直接输回电网。在一个完整下放重物过程中, 回馈到电网电能的平均功率可达 148.2 kW, 能显著提高液压提升机的运行效率和降低运行成本。

参考文献

[1] 吴辉海. 液压绞车[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989

- [2] 曹玉泉, 姜羨英, 孙福才. 关于抽油机电机发电运行状态的探讨[J]. 石油矿场机械, 1994, 23(2): 7~11
- [3] Peng Youduo, Liu Deshu, Guo Yingfu, et al. The dynamic running law study on driving system of hydraulic winder. Journal of Coal Science & Engineering, 2002, 8(1): 73~78
- [4] 胡述龙, 舒干. 抽油机工作中电动机发电运行状态分析[J]. 石油机械, 2000, 31(9): 12~14
- [5] 王泳, 贾利群. 三相鼠笼式异步电动机的发电运行[J]. 平顶山师范学校学报, 2000, 15(2): 34~35
- [6] 曹玉泉. 游梁式抽油机负值功率分析[J]. 河南石油, 2000, (3): 31~33
- [7] 白连平, 马文忠, 杨艳, 等. 关于游梁式抽油机用电动机节能的讨论[J]. 石油机械, 1999, 27(3): 41~44
- [8] 麦崇, 林良养, 翁开潮, 等. 电机学与拖动基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2004
- [9] 周希章, 周全. 电动机的起动、制动和调速[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [10] 夏荣海, 郝玉琛. 矿井提升机械[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1987
- [11] 彭佑多. 矿井液压提升机的机电液协同平衡与控制策略研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2003

Analysis on Load Generating Electricity State of Mining Hydraulic Winder

Peng Youduo¹, Liu Fanmao¹, Yu Bing¹, He Fenghua², Hu Yanping¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of HMFME of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China; 2. Zhuzhou Coal Mine Machinery Plant, Zhu Zhou, Hunan 412003, China)

[Abstract] In the working condition of put-down loadbearing, the winder's electromotor runs in electric power generation mode and feeds back power to electricity net. This paper introduced the electric power generation working condition of mining hydraulic winder's electromotor analysed the main parameters of electric power and calculated the feedback average power to electricity net, which can provide reference to the further study and design of mine winders' economic running speciality.

[Key words] mine hydraulic winder; power generation under the condition of loadbearing; feedback power; average power