系统与附件

瞬变负荷蓄能柴油发电机组预升速技术研究

益　斌，杨文杰，陈　松，张春军，孙玉定

（七一一研究所，上海 200090）

摘　要：针对应用于港口瞬变负荷的蓄能机组在瞬变突加负荷的作用下转速跌落幅度较大的问题，通过理论分析与试验验证，开展了蓄能机组的预升速技术研究。试验验证表明：预升速技术能够提高机组在负荷突加工况中转速跌落后的最低转速，对用于港口瞬变负荷的蓄能机组具有重要的意义。

关键词：柴油机组；蓄能装置；冲击负荷；预升速

中图分类号：TK427　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001－4357(2015)02－0039－04

Speed Pre-raising Technology Study on Diesel Gensets for Impact Load with Energy Storage Devices

Yi Bin, Yang Wenjie, Chen Song, Zhang Chunjun, Sun Yuding

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

Abstract: Aiming at the big speed dropping amplitude of diesel gensets for impact load in port with energy storage devices when a sudden load added, the speed pre-raising technology of diesel gensets with energy storage devices are studied through theoretical analysis and test validation. It has been verified by test that speed pre-raising technology can improve the dropped min-speed after a sudden load added, and is of great importance to the diesel gensets for impact load in port with energy storage device.

Keywords: diesel genset; energy storage device; impact load; speed pre-raising

0　引　言

港口由于装卸机械等周期性作业设备的存在，用电负荷频繁突变。针对港口的瞬变冲击负荷，设计了一种蓄能柴油发电机组，该机组可用于港口的应急供电，目前已成功应用于国内某港口。蓄能机组在柴油机输出轴和发电机输入轴之间串接了飞轮蓄能柴油发电装置，外负荷突变时，飞轮释放或者吸收能量减小机组输出功率的变化，抑制柴油机转速的波动，优化输出的电品质。图 1 所示为某港口所用应急蓄能机组。

经过实际应用验证，与常规机组相比，蓄能机组具有如下优点：

（1）机组的装机功率利用率高，可高达 92.9%；

（2）电品质优良，频率波动范围为－1.54%～1.42%；

（3）蓄能飞轮有效减小并补偿了功率分配不均匀性对机组运行状态的冲击，机组轴系冲击小；

（4）柴油机组长期运行于最经济工况区，油耗较低，电站全生命周期经济性好；

（5）机组台数少，初期投资成本低，并联运行可靠，控制、操作和维护方便。

基于以上优点，蓄能机组对港口而言是理想的应急电源。

本文针对蓄能机组在瞬变突加负荷的作用下转速跌落幅度较大的问题，对蓄能机组的预升速技术开展了研究，以自主搭建的蓄能机组试验样机为平

收稿日期：2014-06-04；**修回日期**：2014-12-05

作者简介：益斌(1973－)，男，高级工程师，主要研究方向为柴油机电站自动控制，E-mail：yibin@csic-711.com。

台，进行了预升速条件下的蓄能机组负荷试验。在试验中，采用不同的预升速方案，测试机组在瞬变突加负荷作用下的工作过程，分析升速提前时间和升速设定转速对机组工作过程的影响规律，包括转速跌落过程、燃油齿条变化和增压器转速的变化等。

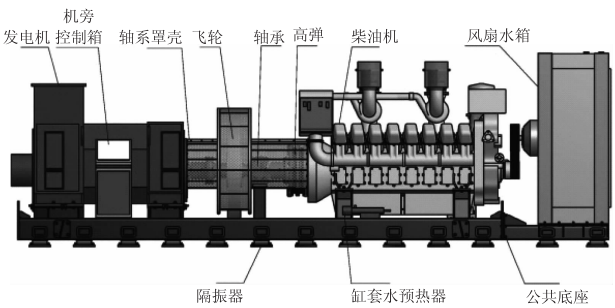

图 1　蓄能机组组成

1　蓄能机组预升速技术分析

针对瞬变负荷设计的蓄能机组，由蓄能机构释放能量来补充负荷突加时对柴油机功率突加的冲击。负荷突加时柴油机被动加载，蓄能机构释放和吸收的能量如图 2 所示。

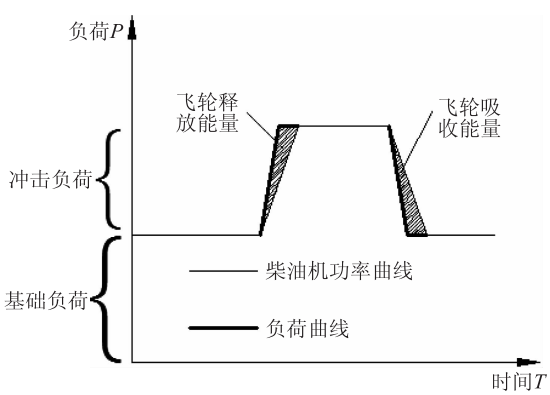

图 2　负荷和柴油机功率曲线图

负荷突加时，蓄能机构释放的能量为：

$$E_J = \frac{1}{2}J(\Delta\omega) \tag{1}$$

由于柴油机的转速调节是基于转速变化的反馈，大的冲击负荷必然会导致机组转速的跌落。而由于电气设备对用电品质的要求，发电机的转速不得低于某一转速，所以因负荷突加引起的转速跌落存在最低限值 ω_{min}。

由公式(1)可知，当 E_J 一定时，J 与 $\Delta\omega^2$ 成反比。在实际工程中，在最大突加负荷已知的情况下进行蓄能机构设计时，通常的做法是将跌落后的最低转速设定在 ω_{min}，以尽量减小蓄能机构的转动惯量。

所谓预升速，就是在瞬变负荷突加前的某一时刻将机组的转速提升至某一转速。

当转速为 ω 时，机组蓄能系统储能为：

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 \tag{2}$$

设突加负荷为 P，若不对机组进行预升速，负荷突加前的转速为 ω_1，跌落后的最低转速为 ω_2；在负荷突加前进行升速，当负荷突加时转速已增加 $\Delta\omega$，与之相对应跌落后的最低转速为 ω_3，则有如下对应关系：

$$P = \frac{1}{2}J(\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{1}{2}J[(\omega_1 + \Delta\omega)^2 - \omega_3^2] \tag{3}$$

由式(3)得：

$$\omega_3^2 = \omega_2^2 + \Delta\omega^2 + 2\omega_1\Delta\omega \tag{4}$$

则有：

$$\omega_3 > \omega_2 \tag{5}$$

由式(5)可看出：预升速能够提高机组在负荷突加工况中转速跌落后的最低转速。

因此，预升速技术可以用于如下几个方面：

(1) 对于某一确定的蓄能机组，其转动惯量 J 和机组所允许的最低转速 ω_{min} 一定。当突加负荷不变时，若使用预升速技术使跌落后的最低转速上升，则转速波动率降低，利于提高电网的供电品质。

(2) 在转动惯量不变的条件下，使用预升速技术，在维持跌落后的最低转速 ω_{min} 不变时，可以增加机组可承受的最大负荷，提升机组功率。

(3) 在进行蓄能机构设计时，结合预升速技术，在满足设计要求的前提下，可以进一步减小蓄能机构的转动惯量。这对针对瞬变负荷而设计的蓄能机组具有重要意义。

2　蓄能机组的预升速工况试验

以自主搭建的蓄能机组试验样机为平台，进行了蓄能机组的预升速工况试验。

2.1　蓄能机组试验样机概况

机组标定转速为 1 450 ($r \cdot min^{-1}$)，主要由 MWMTBD234V6 柴油机、高弹性联轴器、飞轮蓄能装置、发电机、公共底座、机旁控制箱、冷却风扇水箱、油水加热器、起动系统、排气消音器等组成。

蓄能机组惯量系统构成：柴油机轴系惯量：20.3 ($kg \cdot m^2$)；发电机转子惯量：82 ($kg \cdot m^2$)；飞轮蓄能装置惯量：798 ($kg \cdot m^2$)。机组总惯量为：902.3 ($kg \cdot m^2$)。

2.2　预升速工况试验

预升速试验工况见表 1。

表 1　升速设定转速和升速提前时间对照表

序号	升速设定转速/(r·min^{-1})	升速提前时间/s
1	1 460	0.5
2	1 460	1.0
3	1 460	1.5
4	1 460	2.0
5	1 460	3.0
6	1 460	4.0
7	1 470	1.0
8	1 470	1.5
9	1 470	2.0
10	1 470	3.0
11	1 470	4.0
12	1 480	1.0
13	1 480	2.0
14	1 480	3.0
15	1 480	4.0

在蓄能机组的柴油机调速系统中增加预升速功能，外负荷为周期性突变负荷，负荷持续时间和间隔时间均为 10 s，负荷个数为 2 个。首先改变设定的突加负荷功率，进行常规负荷突加试验直到机组输出最大功率 P_0，记录此时的给定励磁电流 I_0，按表 1 所示工况分别改变升速设定转速和升速提前时间，进行预升速条件下的负荷突加突卸试验。根据试验，可以得到在不同升速设定转速下的最优升速提前时间，然后根据不同的升速设定转速及其对应的最优升速提前时间，完成机组所能达到的最大突加负荷功率试验。

3　试验结果分析

3.1　突加负荷相同，不同预升速策略

3.1.1　提前 2.0 s，升速设定转速不同

突加负荷功率相同，升速提前时间为 2.0 s，不同升速设定转速时的试验结果对比如表 2 和图 3 所示。从结果中可以看出，采取预升速控制策略，可以明显提高机组在负荷突加工况工作过程中转速跌落后的最低转速。在负荷突加前提高机组的设定转速时，柴油机齿条位移提前增大，机组转速和涡轮转速都提前上升；当设定转速提高到 1 460 (r·min^{-1})时，在负荷突加之前齿条已开始回拉，但机组转速和增压器转速都还没来得及下降；当设定转速为 1 470 (r·min^{-1})时，在负荷突加之前齿条也有一点回拉但不明显；当设定转速为 1 480 (r·min^{-1})时，在负荷突加之前齿条没有任何回拉。

表 2　提前 2.0 s 不同设定转速时的转速对比

升速设定转速/(r·min^{-1})	负荷突加前机组达到的转速/(r·min^{-1})	负荷突加后跌落的最低转速/(r·min^{-1})
1 450	1 450	1 307
1 460	1 457	1 324
1 470	1 467	1 341
1 480	1 468	1 343

当升速提前时间为 2.0s 时，升速设定转速从 1 460 (r·min^{-1}) 经 1 470 (r·min^{-1}) 再到 1 480 (r·min^{-1})，机组在负荷突加过程中的工作性能不断得到改善，跌落后的最低转速越来越高；但当设定转速从 1 470 (r·min^{-1})升高到 1 480 (r·min^{-1})时，机组跌落后的最低转速升高已经不明显，这主要是因为当设定转速为 1 480 (r·min^{-1})时，由于柴油机调速性能的关系，机组在提前 2.0s 的时间内已经无法使机组的转速进一步提高，导致机组的性能无法进一步改善。所以在升速提前时间为 2.0 s时，最优升速设定转速应比 1 470 (r·min^{-1})稍高，而不能超过 1 480 (r·min^{-1})；如果升速设定转速为 1 480 (r·min^{-1})，必须使升速提前时间大于2.0 s，才能使机组的工作性能达到最优。

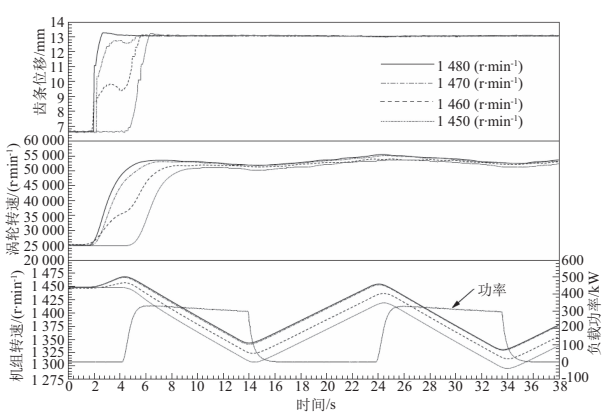

图 3　提前 2.0s 不同设定转速时机组性能参数对比

3.1.2　升速至 1 470 (r·min^{-1})，不同提前时间

相同负荷突加工况，升速设定转速为 1 470 (r·min^{-1})，不同升速提前时间的试验结果对比如表 3 和图 4 所示。

从结果中可以看出，采取预升速控制策略，可以明显提高机组在负荷突加工况工作过程中转速跌落后的最低转速。在升速设定转速均为 1 470 (r·min^{-1})的情况下，当升速提前时间分别设为 1.0 s、1.5 s 和 2.2 s时，提前时间越长机组转速跌落后的最低转速越高，越有利于机组在突变负荷情况下工作性能的改善；在提前升速时间为 2.2 s 时，齿条位移在突加负荷到来之前已经有小幅度的回拉，可以推断如提前时

间再增加机组的性能可能会变差。所以在升速设定转速为 1 470 (r·min^{-1})时，最优升速提前时间应比 2.2 s 稍小，但应高于 1.5 s。

表 3　升速至 1 470 (r·min^{-1})时不同提前时间的转速对比

升速设定转速/(r·min^{-1})	升速提前时间/s	负荷突加前机组达到的转速/(r·min^{-1})	负荷突加后跌落的最低转速/(r·min^{-1})
1 450	0	1 450	1 307
1 470	1.0	1 457	1 330
1 470	1.5	1 462	1 336
1 470	2.2	1 468	1 343

3.2　不同预升速策略时最大功率试验

在不同升速设定转速及其对应的最优升速提前时间条件下，机组所能达到的最大突加负荷功率试验结果如表 4 和图 5 所示。从结果中可以看出，升速设定转速越高，最优的升速提前时间也越长，此时机组所能达到的最大突加负荷功率也越高。机组达到最大突加负荷功率的判断条件为第二个突加负荷时机组的最低跌落转速，都为 1 305 (r·min^{-1})。在各最优预升速方案中，突加负荷到来之前机组的齿条都没有回拉，涡轮增压器转速也持续升高。

表 4　各最优预升速方案时，最大突加负荷试验结果

升速提前转速/(r·min^{-1})	最优升速提前时间/s	负荷突加后的最低跌落转速/(r·min^{-1})	最大突加负荷功率/kW
1 450	0	1 305	303
1 460	1.5	1 305	323
1 470	2.0	1 305	336
1 480	3.3	1 305	350

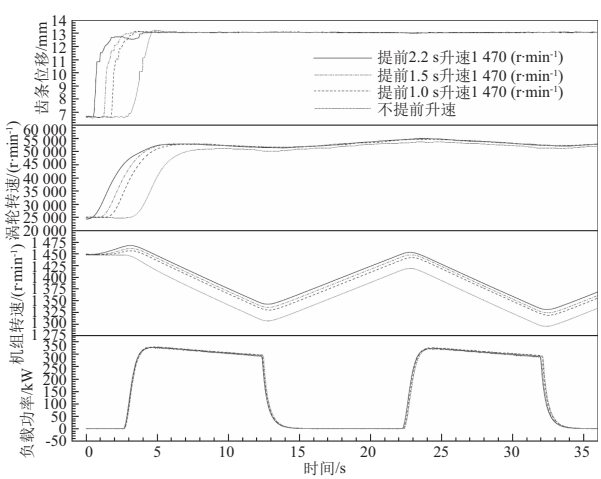

图 4　升速设定转速为 1 470 (r·min^{-1})，不同升速提前时间时的机组性能参数对比

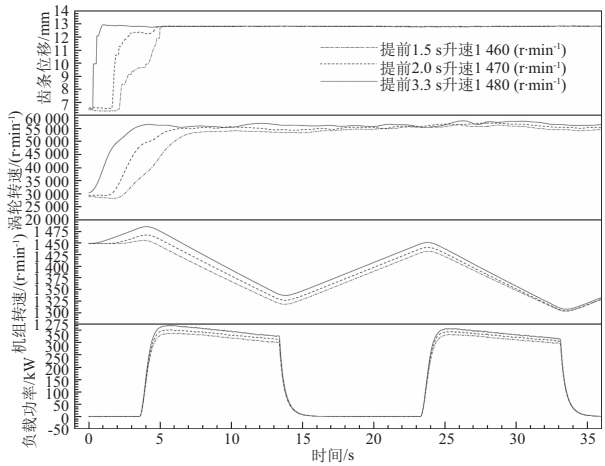

图 5　各最优预升速方案时，最大突加负荷试验机组性能参数对比

试验表明：(1)对于负荷突加工况，预升速技术可以明显提高蓄能机组转速跌落后的最低转速；(2)对于确定的升速提前时间，存在最优升速设定转速使机组的工作性能达到最优；(3)升速设定转速一定时，升速提前时间越长，转速跌落后的最低转速越高，越有利于机组工作性能的改善；(4)升速设定转速越高，对应最优的升速提前时间也越长，此时机组所能承受的最大突加负荷功率也越高。

4　总　结

基于上述分析与试验可知：预升速技术对用于瞬变负荷工况的蓄能机组而言具有重要的意义。一方面，在设计蓄能机构时，结合预升速技术，在满足设计要求的前提下，可以减小蓄能机构的转动惯量；另一方面，对于确定的蓄能机组，采用预升速技术可以提高负荷突加工况中机组转速跌落后的最低转速以提升供电品质，或者通过预升速增大机组所能承受的突加负荷。

参考文献

[1] 楚万秀,卫冬生,马宁,等. 应对港口瞬变负荷的蓄能柴油发电机组电站的设计[J]. 柴油机,2012,34(5):36－38.

[2] 曾宪友,何兵,艾钢,等. 配蓄能惯量质量的柴油发电机组设计和试验研究[J]. 柴油机,2004,26(6):23－24.

[3] 丁东东,巫影,曾凡明. 带脉冲负载的电站柴油机动态性能分析[J]. 海军工程大学学报,2001,13(4).