和利时
HollySys



孤网运行专辑

北京和利时系统工程股份有限公司
BEIJING HOLLYSYS.,LTD.

杭州和利时自动化有限公司
HANGZHOU HOLLYSYS AUTOMATION CO.,LTD









前　言

电网频率的稳定性和准确性，是供电质量的重要指标，也是关系到电网供电安全的重要问题。电网中在役机组一次调频的能力，则表征了电网在局部冲击负荷作用下的自平衡能力和供电频率的稳定程度。我国电网中运行的汽轮发电机组在若干年前还是多数以液调系统为主，由于液调系统结构设计上已经包含了机组一次调频的功能，电网承受冲击负荷的宽容度较大，一次调频问题曾一度被忽视。

随着新机组不断加入电网和老机组进行的电调改造，目前网上在役汽轮发电机组采用电液调节系统（DEH）的数量逐步增加，其发电能力的总和已经大于在役的液调机组的能力总和；而多数装备了DEH的机组由于某些原因（DEH不投一次调频功能，采用功率控制时供电的经济性更好。DEH的控制周期过慢，投入一次调频功能后机组功率控制稳定性变差等等）并未参与电网的一次调频，这就使得电网在容量增长的同时未能维持其相应的自平衡能力，电网的静态调频特性变坏，应付负荷冲击的能力变差。

自2004年末开始，国内各个区域电网管理部门从北美大停电事故的教训中得到启示，从而使机组的一次调频问题再次提上议事日程。2003年8月14日发生的北美大停电，只缘于一条输电线路故障接地，而造成的经济损失仅在美国就高达40亿美元以上。若究其客观原因，电网的自平衡能力差也是扩大灾难影响的原因之一。与此相对，2006年2月19日华中电网一次性丧失90万千瓦在役机组，由于全网投入一次调频的机组容量高达3200万千瓦而避免了灾难的发生。就单机、孤网或区域性小电网的运行安全而言，机组DEH的一次调频功能不仅直接影响供电质量，而且也是构成电网运行安全的防护措施之一。

针对孤立电网的运行特点，和利时的专家经过多年的研究，在实践的基础上总结经验、改进产品，经过几年的探索使装备DEH系统的汽轮发电机组在单机孤网、小网运行时能够充分发挥一次调频的功能，对于保证供电安全起到了关键的作用。本专辑收录了这些专家关于汽轮发电机组孤网运行中一次调频问题的理论分析、解决方案和实用案例文章，对一次调频的功能设置、控制策略、DEH运算控制周期等方面提出了经过实际检验的具体建议。虽然文章中未提及电网在冲击负荷下的潮流分布因素对一次调频问题的影响（在小电网中此项影响可以忽略），但对于电网调频特性分析却具有普遍的指导意义，对解决大电网中的一次调频问题也有重要的实用价值。电网中投入一次调频的机组越多，则更能使我们远离大停电的危险。

杭州和利时自动化有限公司　总工程师 施用昉

目　录

CONTENTS

孤网运行问题综述	罗作桢	1
关于电网调频问题的探讨	罗作桢、刘康宁	5
孤网调频问题探讨	刘康宁	15
霍煤铝电孤网运行成功	刘康宁、罗作桢、纪云峰	22
DEH 系统一次调频功能实践	刘康宁、纪云峰	26
霍煤铝电一次调频总结	纪云峰	31
孤立电网甩负荷试验	刘康宁、郑明	36
大连西咀 DEH 孤网运行	纪云锋	40
华东某发电厂小网事故分析	罗作桢	42

孤网运行问题综述

杭州和利时自动化有限公司　罗作桢

1 、概述

电力生产问世以来，发电机组并列运行便是向用户提供可靠的、高质量的电能的主要方式。随着经济发展和社会进步，电能需求逐渐增加，使电网的规模越来越大。电网的规模大小，体现了一个国家的综合国力。90 年代初期起，我国已进入大机组、大电网时代，300MW 以上的大机组逐渐成为电网中的主力机组。到2005 年底，我国总装机容量已达到5 亿千瓦，为工农业生产和人民生活提供了充足的电能。

与小网和孤网相比，大电网具有很多优势：

1）在大电网中，电能的供应可在地区间相互支援，保证了供电的可靠性和连续性。

2）在大电网中，各发电机组和被驱动的机械具有巨大的旋转惯量，其储存的动能可以在瞬间释放出来，支持负荷变化，使电网频率变化维持较小的变化速度。起到动态稳频作用。

3）与电网中各汽轮机相配的锅炉群，储存有庞大的热力势能，可以通过汽轮机的调速系统快速调出，以支持负荷变化，使频率的变化自动控制在有限的范围内，使电网频率达到静态稳定。

4）大电网好比是无限大电源，用户负荷变化对电网电压影响很小，所以大电网具有稳定的电压。

综上所述，可见，大电网具有供电可靠，频率稳定和电压稳定的优势。

但是，大电网不并不能涵盖所有的供电需求。在下列情况下，仍会出现小网或孤网运行。

1）我国电网是由小到大逐渐发展起来的，在特定的情况下，大网还可能解列，出现小网工况。

2）在大网未能达到的地区，仍需采用小网供电。

3）一些工厂的自备电站，由于种种原因，需要采用孤网运行。

4）出口到不发达国家的机组，可能要适应孤网运行的要求。

5）对于甩负荷带厂用电的机组，甩负荷后变为孤岛运行方式，相当于单机带轻负荷。

以上种种情况说明，孤网运行技术的研究仍然具有重要意义和现实意义。

2 、孤网运行的概念

孤网是孤立电网的简称，一般泛指脱离大电网的小容量电网。

电力建设规程曾有规定，电网中单机容量应小于电网总容量的8％，以保证当该机发生甩负荷时，不影响电网的正常运行。例如60 年代初期我国开发20 万千瓦机组时，只有东北电网具有容纳该机组的能力。当时东北电网容量约为300 万千瓦。

电网中的各机组，一般都有10％～15％的过载余量，如果电网中的机组调速系统都正常投入，一旦某机组发生甩负荷，并且该机组容量为电网总容量的8％，则电网所失去的功率可以暂时由网中其他机组的过载余量承担，电网频率下降0.2Hz，相当于机组转速下降12r/min，对供电质量的影响仍在运行规程规定的范围内。

最大单机容量小于电网总容量的8％的电网，可以称为大电网。目前我国各大地区电网的机网容量比已经远小于8％，可以看作是无限大电网。

相比之下，机网容量比大于8％的电网，统称为小网；孤立运行的小网，称为孤网，孤网可

分为下列几种情况。

1）网中有几台机组并列运行，单机与电网容量之比超过8％，称为小网。

2）网中只有一台机组供电，称为单机带负荷。

3）甩负荷带厂用电，称为小岛运行工况，是单机带负荷的一种特例。

孤网运行最突出的特点，是由负荷控制转变为频率控制，要求调速系统具有符合要求的静态特性、良好的稳定性和动态响应特性，以保证在用户负荷变化的情况下自动保持电网频率的稳定。这就是通常所说的一次调频功能。运行人员关注的问题不再是负荷调整，而是调整孤网频率，使之维持在额定频率的附近。这种调整通过操作调速系统的给定机构来完成，称为二次调频。由于孤网容量较小，其中旋转惯量储存的动能和锅炉群所具备的热力势能均较小，要求机组的调速系统具有更高的灵敏度，更小的迟缓率和更快的动态响应。

对于小网工况，网中各机组存在负荷分配问题，要求各机调速系统具有相同的调速不等率，要求网中有调度机构进行二次调频，维持额定频率。

对于单机带负荷，或带厂用电工况，由于没有负荷分配问题，可以采用由PI调节器组成的无差调速系统，自动完成一次调频和二次调频。

综上所述，为适应孤网运行要求，汽轮机的调速系统应具有下列特性。

1）调速系统应采用有差调节，以实现一次调频；在小网中各机组调速系统应有相同的不等率，通常取为4.5%～5%，以适应负荷分配的需要。

2）对于单机带负荷机组，可增加无差二次调频，实现自动二次调频，其他情况下，二次调频应按调度要求，手动或自动实现。

3）一次调频的实施范围应涵盖油动机全行程。

4）调速系统的迟缓率应符合IEC规定，一般不应另设调频死区。

5）调速系统应具有良好的稳定性和动态响应特性。

在液压调节系统的时代，常规的机械液压调速系统一般都能够适应孤网运行的要求。只是二次调频的自动化程度较低。

3、DEH调频问题

80年代中期，我国引进了美国西屋公司的DEH技术。按照西屋公司的控制策略，当机组并网后，DEH即退出一次调频，按等负荷方式运行。电网的调频问题由网调去处理。这与我国习惯采用的机械液压调速系统控制策略完全不同。机械液压调速系统能在机组全负荷范围内参与一次调频，并能接受调度指令参加二次调频。电网中所有机组的调速系统都在正常投入状态，并且不能人为退出。虽然机械液压调速系统迟缓率略大，但在总体上保证了电网的安全运行。无论是大网、小网还是单机工况均能正常工作。

DEH控制为离散控制，其稳定性、快速性与连续调节有很大区别。在DEH实践中发现，DEH的转速调节系统，稳定性远低于机械液压调速系统，这是由于离散控制系统存在采样失真和运算延迟，导致系统稳定性下降。只有将控制周期设定得足够小，其稳定性才能趋近于连续调节系统。

MATLAB分析证明，现行各种DEH，其调速系统均不同程度地处于稳定性较差的状态。

由于调速系统的稳定性较差，在机组并网后，如果投入一次调频，便造成负荷波动大。许多人将这种现象解释为DEH太灵敏、抢负荷，所以设置调频死区，或干脆退出一次调频，回避了稳定性问题。这是一种不当的控制策略，其结果是DEH机组不参与调频。在大电网的情况下，少数

机组不参与一次调频，对电网频率稳定性影响不大，因而不为人们所重视；随着大机组进入主力，DEH 不调频，对电网频率的影响越来越大，尤其是发生小网工况，往往因此造成网频大幅度波动，甚至导致停机或电网崩溃。

在孤网运行的情况下，网中的各机组必须参与一次调频，必须具有静特性正确、稳定性好、动态响应快的调速系统，必须解决 DEH 参与一次调频的问题。这是 DEH 参与孤网运行的关键技术问题 。

虽然机械液压调速系统迟缓率略大，但在总体上保证了电网的安全运行。无论是大网小网或单机运行工况，均能正常工作。因此机械液压调速系统的静态、动态特性和控制策略，可以作为指导解决 DEH 调速系统一次调频问题的依据。

4 、孤网运行的控制策略

对于为孤网运行机组配套的 DEH，建议采用下列控制策略。

4．1 一次调频特性

1）调速不等率统一设置为 5 %。

2）调速系统迟缓率按 IEC 规定：150MW 以下的机组，小于 0.1%，150MW 以上的机组，小于 0.06%。

3）不得再设置调频死区，设置调频死区等于增大迟缓率。

4）在油动机全行程范围内，均为一次调频范围。当电网周波低时，网中所有机组应尽其所能支持电网负荷，避免电网崩溃。因而不能人为限制油动机行程以限制一次调频范围。锅炉调压系统按负荷变化的平均值调整燃料量及相关系统；负荷增加幅度较大时，可考虑前馈信号加速燃料调整 。

5）调速系统应当正常投入，不能人为切除。

6）DEH 调速回路（一次调频）应设计成快速响应回路，其静特性、稳定性和动态响应特性应符合一次调频的要求。

7）油动机时间常数应小于 0．3s，建议 0．2s。（注意：油动机时间常数是指小信号的响应时间，不是快关时间）

8）在安排小网运行方式时，应考虑留有一定的旋转备用容量，以支持一次调频功能的发挥。

9）孤网运行方式时，DEH 应采用阀控方式，由阀控回路实现一次调频。

4．2 二次调频

1）对于小网运行，二次调频应由网调执行，可采用自动方式或人工方式，调整网中各机调速系统的给定机构。

2）对于单机带负荷或带厂用电工况，可采用无差调节方式实现自动二次调频。

4．3 OPC 方式

1）和利时建议采用加速度信号作为 OPC 的起动判据。

2）取消 103 %no 判据。

3）仍可保留油开关跳闸信号，该信号代表功率负荷不平衡，与加速度判据等价。

4）不建议采用负荷功率不平衡判据，原因是电负荷传感器延时和调节级压力测量延时，使判据动作延时。

5 、和利时的贡献

和利时开发了两种方案，解决了DEH一次调频回路的稳定性和快速性问题。

1）设计和开发了快速一次调频回路，控制周期采用了50ms，在系统负荷率增加不多的情况下，解决了稳定性和快速性问题。

2）设计和开发了一次调频板，采用动态补偿原理，解决了采样失真和运算延迟问题，在不改变原系统控制周期的前提下，实现了一次调频回路的稳定、快速控制。

6 、效果

本文所列的控制策略，已经在霍煤、魏桥、建峰、大连西咀、迁安等工程上应用，取得了良好效果。详见本专辑所列相关论文的论述。

7 、结论

1）孤网运行的关键是如何维持网频稳定。

2）维持网频稳定的关键是调速系统的一次调频能力。

3）DEH一次调频的关键是如何解决离散控制系统的采样失真和运算延迟问题，即稳定性和动态响应问题。

4）通过研究、开发、实践，和利时已解决了上述关键，实现了小网，单机和甩负荷带厂用电等工况的频率稳定控制。



关于电网调频问题的探讨

杭州和利时自动化有限公司　　罗作桢　刘康宁

摘要：本文讨论了电网调频特性，和调频实践中提出的一些问题，强调了一次调频的重要性，应从技术上和管理上规范机组的调频行为。

1 、概述

调频问题，曾经是电网运行备受关注的课题。电网频率的稳定性和准确性，是供电质量的重要指标。电网频率的变动和偏差，对用户和原动机的影响和危害是众所周知的。如何保证电网频率的稳定和准确，是调频问题研究的主要内容。

同时，调频过程又是电力生产过程中调整能量平衡的过程。通过调频，调动各种蓄能和热力系统的能量供应，实现发电和用电的能量平衡，和实现电负荷的合理分配。

随着电网容量的日益扩大，负荷变化对电网频率变化的影响相对减小，电网频率的稳定性提高了。DEH 的应用，大大提高了汽轮机调节系统的性能、可靠性和自动化水平，为提高电网频率的稳定性和准确性提供了很好的技术保证。然而，如果DEH 的功能应用不当，又会给电网调频造成一些不良影响。例如，在实践中，一些配有DEH 的机组，正是利用了DEH 组态的灵活性，实际上使机组退出一次调频，相当于这些机组没有调速系统，其结果使电网的静态调频特性变坏，增加了二次调频的负担。如果因电网故障形成孤网运行工况，还可能造成电网振荡。如果发生单机带负荷工况，甚至可能引起机组超速，这是非常危险的。

电网频率的稳定性，取决于电网的调频特性，包括：

1）自然调频。这是电网的动态调频特性，其特点是利用电网中旋转惯量的蓄能，首先承担电网负荷变化。在这一过程中，电网频率偏差将随时间增大。

2）一次调频。这是电网的静态调频特性，其特点是通过电网中各机组调速系统的静特性，利用锅炉的蓄能，最终承担电网负荷变化，使电网频率变化稳定在静特性规定的偏差范围内。DEH 的一次调频修正功能，实际上是机组的调速系统。

自然调频过程是自然完成的，不需任何调整手段；一次调频则是依靠原动机调速系统自动完成的，不需要人为干预。自然调频和一次调频，构成电网调频特性。

电网频率的准确性，靠二次调频来保证。

二次调频是一个人工干预的过程，通过手动或自动方式，改变调速系统的给定值，将电网的负荷变化最终转移到由预先指定的调频机组来承担，消除一次调频过程留下的频率偏差，使电网频率回到额定值。

二次调频的能量支持，在火力发电厂中须靠相应调整锅炉燃料获得。

因此，调频问题包含了三个命题，即自然调频，一次调频和二次调频。

本文企图通过关于调频问题的探讨，为正确发挥DEH 的调频功能提供帮助。

2 、电网的调频特性

电网的调频特性，是指电网负荷变化所引起的电网频率变化的传递关系，包括动态调频特性和静态调频特性。

电网调频特性，用电网负荷---频率传递函数来描述。

假 定：

1）忽略负荷变化的电磁过程和电网中各机组间功角变化过程。

2）将电网中所有机组的转子和负载的旋转惯量看作是刚性地联系在一起，构成一个等效大转子。各原动机主动力矩和负载阻力矩，同时作用在电网等效转子上。

3）忽略原动机和负载自平衡能力的影响。相对调速系统静特性而言，这些自平衡能力对静态调频特性影响很小。

4）涉及电网的参数，相对量以电网额定容量为基准，涉及各机组的参数，相对量以机组的额定功率为基准。

假定所研究的电网，由n台机组并列组成，编号为1，2，……，n，每台机组主动功率分别为N_1，N_2，……，N_n，负载功率为L，作用在等效大转子$\frac{1}{T_{aw}S}$上，共同维持网频φ的平衡。每台机组额定功率占电网额定容量的比例分别为C_1，C_2，……，C_n，各机组调速系统的不等率分别为δ_1、δ_2、……δ_n，调速系统给定信号（同步器）分别为g_1、g_2、……，g_n。

根据上述假定，电网调频特性数学模型如图1。

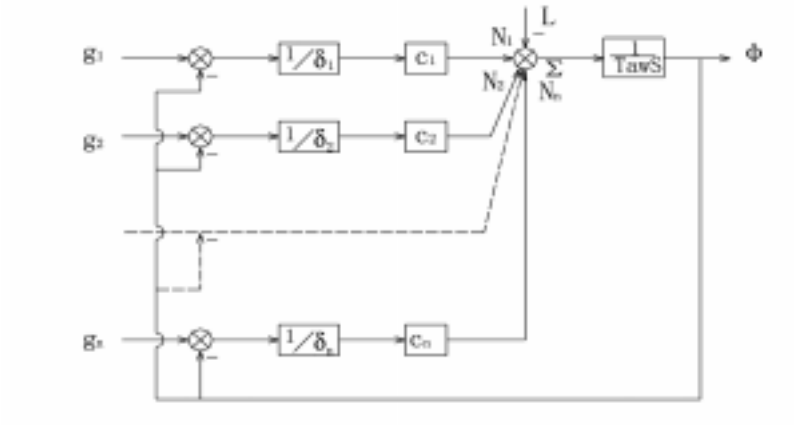


图1 电网调频特性数学模型

由图1推知，当g_1，g_2，……，g_n不变（为0）时，电网传递函数为

$$\frac{\varphi}{L}=\frac{1}{T_{aw}S+\frac{1}{\delta_w}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

式中：

$$T_{aw}=\frac{(J_1+J_2+\ldots+J_n+\sum J_L)\omega_O}{M_O}$$

$$=T_{a1}C_1+T_{a2}C_2+\ldots+T_{an}C_n+T_{aL} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

$$\frac{1}{\delta_w}=\frac{C_1}{\delta_1}+\frac{C_2}{\delta_2}+\ldots+\frac{C_n}{\delta_n} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

T_{aw} 为电网等效转子的转子时间常数，代表了电网的自然调频能力。

$\frac{1}{\delta_w}$ 为电网自平衡系数，代表了电网频率稳态平衡能力或称自平衡能力。

δ_W 为电网等效不等率，它代表了电网静态调频特性，即一次调频特性。

2.1 电网动态调频特性

电网动态调频特性，即电网自然调频特性。

根据图1，当网中各机组调速系统不动作时，便得到电网自然调频特性。

$$\frac{\varphi}{L}=\frac{1}{T_{aw}S} \quad \cdots\cdots (4)$$

由此推知

$$L=T_{aw}\frac{d\varphi}{dt} \quad \cdots\cdots (5)$$

式（5）说明，电网负荷变化初期，负荷变化量是靠转子动能变化来承担，其结果电网频率偏差将随时间增大。

由式（2）和式（5）推知：

$$L=(J1+J2+\ldots+Jn+\sum J_L)\frac{\omega o}{Mo}\frac{d\varphi}{dt} \quad \cdots\cdots (6)$$

式（6）说明，电网负荷变化量按转动惯量分配到网中各机组转子上，负载旋转惯量也承担了一部分负荷变化，所有转子转速按同一加速度变化。

电网容量大小对自然调频的影响，体现在负荷扰动量占电网容量比例的大小，即L的大小上。由于电网容量增大时，相对负荷扰动L变小，根据（5）式，$\frac{d\varphi}{dt}$ 变小，因而电网频率变化变慢，或频率稳定性变好。电网等效转子时间与机组转子时间数值相当。

例如，电网中一台300MW机组发生用负荷，所产生的负荷扰动，对于20000MW容量的电网而言，为L=0.015，假定T_{aw}=16秒，对应的频率变化率为$\frac{df}{dt}$=0.047Hz/秒，大约经过5秒钟，频率偏差超过0.2 Hz，而对于4000MW容量的电网，L=0.075，对应的频率变化率为$\frac{df}{dt}$=0.23Hz/秒，在不到1秒钟便超过了允许频偏0.2 Hz。以上数据说明，尽管电网容量增大后，同样的负荷扰动下频率变化变慢，但是，如果没有一次调频的支持，频率偏差仍将很快超过允许值。

2.2 电网静态调频特性

电网静态调频特性，是电网中所有机组调速系统一次调频的综合结果，由式（1）推知，稳态时：

$$\frac{\varphi}{L}=\delta_W \quad \cdots\cdots (7)$$

式（7）便是电网静态调频特性，也称电网静特性，是电网的重要特性。电网运行人员正是根据电网静特性，计算出当时网频下的功率余缺，指示调频机组调整出力，实现二次调频。

根据式（3）和式（7），推知电网频率变化和负荷分配：

$$L=\varphi(\frac{C_1}{\delta_1}+\frac{C_2}{\delta_2}+...+\frac{C_n}{\delta_n}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（8）$$

式（8）说明，电网负荷扰动最终按不等率分配到网中各机组上，产生同一的静态频率变化 。

式（8）说明，不等率小的机组将承担较多的负荷分配。通常，网中各机组按容量相对值承担相同的一次调频量，所以各机组调速不等率具有大致相同的数值，一般为0.045～0.05。如果网中各机组不等率相同，则负荷变化将按机组容量与电网容量的比例分配到各机组上。

仍以2.1节举例为例，说明一次调频对电网频率稳定的重要作用。假定20000MW的电网中发生一台300MW机组甩负荷，电网稳态频率偏差为 Δf =0.0375Hz，并且0.8秒之后达到稳态。而对于4000MW电网而言，300MW机组甩负荷后的稳态频偏为 Δf =0.1875Hz，0.8秒后达到稳态。

以上的数据说明，只要电网中各机组正常投入一次调频，则电网受到扰动后会很快达到稳态频偏，并且电网越大，稳态频偏越小，这显示了大电网频率稳定性好的优点。

3、电网二次调频

电网频率的准确性，靠电网二次调频来保证。

所谓频率准确性，就是使电网频率保持等于额定值。实践中，电网频率的允许偏差为±0.2Hz。

二次调频是一个人工干预的过程，通常由指定的部分机组来完成，这些机组称为调频机组，通常所称某机组是否参与调频，实质上是指参与二次调频。

如图1所示，二次调频过程是根据电网频率偏差，通过改变调频机组调速系统的给定值，改变调频机组的负荷分配，将电网负荷变化转移到由调频机组来承担，使电网频率回到额定值。调整结果网中不参加二次调频的机组，其功率自动回到扰动前的数值。

二次调频通常是由网调调度来实施。电网调度人员通过人工或自动手段，控制调频机组调速系统的给定值，完成二次调频过程。

二次调频的能量支持，在火力发电厂中来自锅炉燃料量的改变，最终实现电网负荷变化与热力系统燃料提供的能量变化相平衡，达到最终的调整稳态。

二次调频与一次调频的关系，可用图2说明。

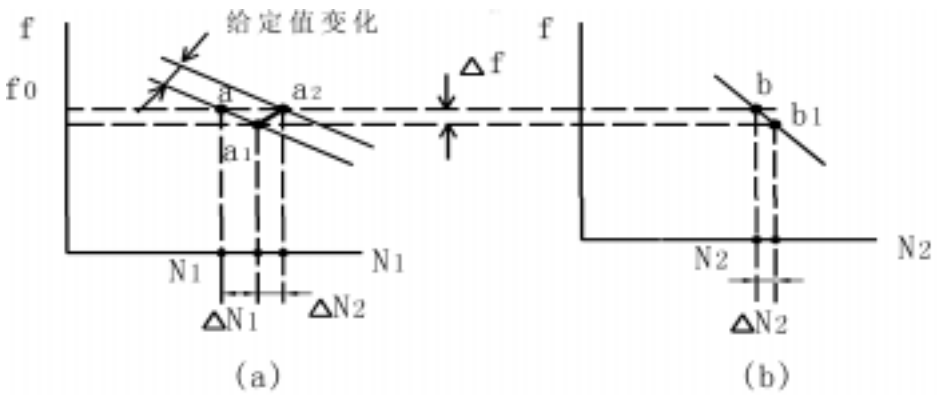


图2 一次调频和二次调频的关系

图中，（a）、（b）为两台并列运行机组的静特性。负荷扰动前，工作点分别为a点和b点，所带负荷分别为N_1和N_2，具有共同的频率f_0，假定电网用户负荷发生变化为ΔN，电网频率相应变化为Δf，两台机组功率按各自的静特性发生变化，变化量分别为ΔN_1和ΔN_2，且$\Delta N_1+\Delta N_2=\Delta N$。两台机组的工作点变化分别为$a\rightarrow a_1$和$b\rightarrow b_1$，这个过程为一次调频。由图2还可见，a机不等率比b机小，所以a机所分配的负荷变化量ΔN_1较b机的ΔN_2为大。

假定a机为调频机组，通过手动或自动改变a机调速系统的给定值，使静特性平移到的a_2位置。a机的工作点由$a_1\rightarrow a_2$，所带负荷为$N_1+\Delta N_1+\Delta N_2$，$\Delta f\rightarrow 0$，电网频率回复到额定值$f_0$。同时，b机工作点由$b_1$回到b，所带负荷由$N_2+\Delta N_2$回到扰动前的$N_2$。这个过程称为二次调频。由图2可见，二次调频是一个负荷再分配的过程，其调整结果，将电网负荷变化转移到调频机组上，使电网频率调回到额定值。

通常，一次调频为比例调节，调整结果有一静差；二次调频为积分调节或比例积分调节；调整结果静差为零。

4、电网调频过程描述

通过第2、3节的分析，可将电网调频过程归纳为三个阶段。

第一阶段为自然调频，电网负荷发生变化后，该变化量首先按转动惯量分配到各机组转子上，利用转子蓄能承担负荷变化，网频偏差随时间逐渐增大。这一阶段不需任何调整，是自然完成的；这一阶段响应时间约为零点几秒数量级。

第二阶段为一次调频，通过调速系统的作用，利用锅炉的蓄能，将第一阶段的负荷分配转移到按不等率分配到各机组上，最终形成一个稳态频率偏差，这一阶段是通过调速系统自动完成的，不需要人为干预。这一阶段的响应时间为几秒数量级。

一次调频阶段，一般不需要锅炉燃料调节支持，但是如果没有相继进行二次调频，则锅炉蓄能将随时间增加逐渐耗尽，需要通过燃料调节保持汽压稳定，才能保持一次调频的结果，这实质上是通过燃料调节，获得支持一次调频负荷分配的能量。一次调频后的燃料调整，是按负荷变化的平均值进行调整，不需要跟随一次调频过程快速调整。

第三阶段为二次调频，通过人为干预，改变调频机组调速系统的给定值，将一次调频形成的负荷分配转移到由调频机组来承担，使电网频率回到额定值，同时，非调频机组承担的负荷变化量按静特性自动回到扰动前的数值。这一阶段的响应时间为十几秒到几十秒数量级，通过二次调整，将电网负荷变化最终转移到由调频机组来承担，所需的能量支持来自燃料调节。

5、一些问题的探讨

5.1 原动机和负载自平衡的影响

本文在讨论电网调频特性时，曾经忽略了原动机和负载自平衡的影响，现对这种自平衡的影响作一估计。

当电网频率发生变化时，原动机出力和负载功率都会发生一定的变化，这种变化阻止频率偏差的发展，所以是一种自平衡。统计资料表明，汽轮机的自平衡系数约为$\beta_1\approx 0.6$。负载自平衡系数β_2与电网中不同性质负荷所占比例有关，据统计，电网负载自平衡系数$\beta_2\approx 1\sim 3$。

原动机和负荷的自平衡系数为$\beta=\beta_1+\beta_2$。

考虑上述自平衡的影响，电网负荷---频率传递函数变为：

$$\frac{\varphi}{L}=\frac{1}{T_{aw}s+\beta+\frac{1}{\delta_w}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

式（9）表明：电网动态调频特性仍然取决于T_{aw}，而静态调频特性变为

$$\frac{\varphi}{L}=\frac{1}{\beta+\frac{1}{\delta_w}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

比较式（10）和式（7），可见原动机与负载自平衡系数只影响电网静态调频特性，使电网的自平衡能力略有增加，但与调速系统的平衡能力相比，其影响是可以忽略的。

现仍以300MW机组甩负荷为例，说明原动机与负荷自平衡对稳态频偏的影响。

假定β=2.6，δ_{w}=0.05，稳态频偏如下表：

电网容量	不投一次调频	投入一次调频
20000MW	0.288Hz	0.03319Hz
4000MW	1.442Hz	0.1659Hz

原动机和负载自平衡的存在，虽能阻止网频变化的无限发展，但频率偏差之大仍是难以接受的。所以不能指望靠原动机和负载的自平衡来维持网频稳定，网频稳定必须依靠调速系统。

5.2　负荷变化对调频过程的影响

电网负荷变化是电网中众多用户负荷变化的综合结果。电网总负荷量是一个随机变化的过程，对于具体的电网而言，其日负荷变化曲线有特定的规律。分析日负荷曲线可知，日负荷曲线的构成是在基本变化的基础上，带有不同周期和幅度的快速波动。其中，快速变化部分（在秒级以内），变化幅度很小，落在自然调频范围内；较快变化部分（在十秒级以内），变化幅度较小，落在一次调频范围内；变化较慢的波动（十几秒至几十秒）变化幅度较大，落在二次调频的范围；再慢的变动（十几分钟级以内）属负荷的基本变化部分由调峰机组来承担。二次调频的调整量，是一次调频和调峰后的剩余功率余缺。

负荷快速变化的幅度，与电网中单个大型设备的容量有关。由于单个设备的容量不随电网容量的增大而增大，因此，对于大电网而言，负荷快速变化的幅度相对较小，即式（1）中相对扰动L较小，因此网频稳定性相对较好。就是说，随着电网容量的增大，负荷扰动对网频的影响减小，使网频变得稳定，这是大电网供电质量的重要优势。例如，在小电网中难以解决的冲击负荷问题，到了大电网时代就自然解决了。

电网中容量最大的机组发生甩负荷时，会产生最大的负荷扰动。为了限制这种扰动对网频的影响，电力建设规范规定单机容量应小于电网总容量的8%。

突变负荷的影响，仍属一次调频的范畴，容量较大的突变负荷，会造成较大的功率负荷不平

衡，形成较大的网频偏差，需要二次调频及时跟上，以稳定网频。

5.3 关于小网运行问题

我国电网的发展特点是由小到大。许多电厂在建厂初期，只是区域性电网，随着电力工业的发展，各地区电网逐步联结起来，形成大电网。在某些特定的情况下，大电网发生解列时，某一地区电网就可能从大网中分解出来，形成小网运行；甚至，如果小网中只有一台机组在运行，则该机组便处于单机带负荷运行状态。

当小网从大网分离出来后，小网的频率调整和负荷平衡就由小网中各机组的调速系统来完成，包括自然调频、一次调频和二次调频，以维持小网的正常运行。因此，各机组一次调频功能的正常投入，对维持小网正常运行是至关重要的。如果是单机运行，则孤网的正常运行完全取决于该机调速系统的正常工作。

如果小网中各机组均为液压调速系统，并且各调速系统基本正常，那么当小网从主网分离出来后，便自然过度到小网运行，运行人员只需调整同步器，便可使小网频率维持额定值。如果小网中有一部分是带DEH的机组，则DEH的组态必须采取下列措施，才能满足小网运行的要求：

1）一次调频功能必须正常投入，调速不等率应设置在δ=0.045左右。

2）一次调频回路的不调频死区应设置为0，系统迟缓率应符合IEC规定。

3）OPC控制回路中的103超速予警功能应退出。

应该强调指出，一次调频功能就是调速系统功能，不投一次调频就是不投调速系统。在小网工况下，没有调速系统的机组将会给小网安全运行带来极大的危害。如果说，在大电网中，没有调速系统的机组仍能正常运行，那么，在小电网中运行的机组，必须具有调速系统。用户在配置DEH时，必须认真考虑发生小网工况的可能性。DEH采取了上述二项措施后，其调速性能和安全性便达到小网正常运行和安全运行的要求。

曾经不止一次地发生过这样的事件：一些配有DEH的机组，其一次调频功能被退出，当发生小网工况时，剩余功率使小网频率大幅度上升，当机组转速升高到3090r/min时，103予警动作，快关调门，使小网功率发生空缺；网频迅速降低，103予警复位，调门再次打开，功率再次过剩，转速再次飞升。如此往复循环，造成电网振荡。严重时，甚至造成电网崩溃。

其实，只要DEH采取上列二条措施，则这种情况完全可以避免。

5.4 各种不同类型机组对调频的响应

1）母管制冷凝式机组，具有稳定的蒸汽参数，机组功率随调门位置变化而变化，动态响应快，具有很好的一次调频响应；锅炉调压系统按负荷平均值调节燃料量，二次调频响应也较快。

2）中间再热机组，由于中间再热器热容惯性的影响，中、低压缸调频响应较慢，相当于只有高压缸能参与一次调频，一次调频容量只有机组容量的三分之一。对于二次调频，该型机组能全容量响应。

3）汽包炉单元机组，汽包具有较大的蓄能，对于一次调频有较好的适应能力。通过协调控制调整锅炉燃料量，能适应二次调频的能量平衡需求。

4）直流炉单元机组，锅炉蓄能较小，在低负荷区，采用旁路调压，机组仍有较好的一次、二次调频响应；在高负荷区，一般采用机调压方式运行，调频响应受到锅炉动态特性的影响，一次调频响应较差，但经过适当的协调控制，能适应二次调频或调峰的响应要求。

5.5 不参加一次调频的机组，怎样维持转速稳定

一次调频是汽轮机调速系统的控制行为，当机组采用液压调速系统时，一次调频是不能退出的。

当机组采用DEH后，由于计算机控制的灵活性，在下列情况下，发生一次调频功能丧失：

1）DEH在紧急手动状态；

2）DEH一次调频修正回路不调频死区设置过大；

3）改变组态，人为地将一次调频修正退出。

一次调频修正回路的作用相当于汽轮机调速系统在并网带负荷时的作用，该回路退出工作，相当于机组没有调速系统。

机组退出一次调频后，调门位置不受转速偏差控制，保持一定位置不变，机组转速跟踪电网频率，维持稳定。

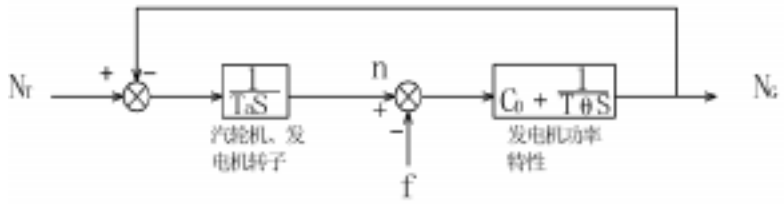


图3 发电机与电网并列运行方块图

图3表达了汽轮发电机组与电网并列运行传递函数关系，NT为汽轮机功率，NG为发电机向电网输送的有功功率，n为机组转速，f为电网频率。从图3看出，传递关系由两个无差反馈回路组成，具有如下稳态关系：

a、送往电网的发电机有功功率NG等于汽轮机功率NT；

b、机组转速n等于电网频率f。

因此，不论任何原因引起的机组转速变化，都将通过发电机功率的动态变化，使之回到与电网频率相等的数值，因此，对于机组转子而言，发电机功率反馈相当于一个以网频为给定值的无差调速系统，只要电网频率稳定，则机组转速必定稳定；但是，如果电网频率发生波动，则机组转速将跟随波动。

通常，机组并列在大电网运行，大电网频率十分稳定，所以即使机组没有调速系统，机组转速仍然十分稳定。这便使人产生一种错觉，似乎不投一次调频功能，DEH会更稳定。正是在这种错觉支配下，很多用户退出了一次调频。当电网发生故障，使大电网分割为小电网时，没有一次调频的机组将导致孤立网频率发生大幅度偏离，机组转速也将随网频变化而大幅度变动，甚至使孤立网不能稳定运行。

所以，虽然在大电网中，没有一次调频的机组仍能稳定运行，但是，决不能因此而不投一次调频，特别是可能发生小网运行工况的机组，一次调频功能投入更加重要。

5.6 一部分机组不参加一次调频，对电网调频特性有什么影响

一部分机组不参加一次调频，将影响电网静态调频特性。

根据式（3），假定电网中所有机组都参加一次调频，各机组调速系统具有相同的不等率δ，则电网的等效不等率等于各机组的不等率，即

$$\delta_W = \delta_1 = \delta_2 = \cdots\cdots = \delta_n = \delta$$

在这种情况下，电网的自平衡能力最强。

通常总有一些机组不参与或少参与一次调频。

假定，总容量为 C_a 的机组，正常参与一次调频，不等率为δ，总容量为 C_b 的机组为单元制中间再热机组，一次调频等效不等率为3δ；总容量为 C_c 的机组为带基本负荷的中间再热机组。不等率约为6δ，总容量为 C_d 的机组退出一次调频，其不等率为∞，则电网的自平衡系数为：

$$\frac{1}{\delta_w}=\frac{C_a}{\delta}+\frac{C_b}{3\delta}+\frac{C_c}{6\delta}+\frac{C_d}{\infty}$$

$$=\frac{C_a}{\delta}+\frac{C_b}{3\delta}+\frac{C_c}{6\delta} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

现举一例子作为估算（所取各型机组容量未经统计，纯属假定）。

假定网中20%容量机组为冷凝式机组，正常参加一次调频，Ca=0.2。

80%容量为单元制中间再热机组，其中20%参加正常一次调频，30%带基本负荷，30%不参加一次调频，则Cb=0.2，Cc=0.3，Cd=0.3。

假定δ=0.05，根据式（11），求得电网等效不等率为δw=0.158，自平衡系数 $\frac{1}{\delta_w}$=6.33。

$\frac{1}{\delta_w}$ 的理想值为20；上述情况，不到理想值的 $\frac{1}{3}$ ，在相同的负荷扰动下，频率偏差增至3倍，这无疑要求加快二次调频的调整频度，以减小电网动态频率偏差。

不参加一次调频的机组越多，这种现象越严重。

鉴于不参加一次调频的机组主要是装有DEH的大型机组，对电网调频特性影响大，因此，对这个问题应引起足够重视，要求这些机组尽量参加一次调频。

5.7　关于“压线运行”的分析

“压线运行”是网调对网中运行机组的一种考核方式，要求机组严格按照规定的负荷运行。

一种考核方式是，不论网频如何变化，只要负荷偏离规定的数值，就要罚款。这种考核方式实质上是等负荷运行，完全不考虑网频变化的影响。由于网频总是不断变化的，运行人员不得不随时调整机组调速系统的给定值，保持“压线”。

图4是这种运行方式的形象描述。假定机组原来运行在点1，网频为f0，压线功率为N0，当网频下降到f1时，机组功率增加到N1，运行人员调整调速系统的给定值使之回到N0，负荷变化过程为1→2→3。相反，当网频增大到f2时，负荷变化过程为1→4→5。稳态运行线为3-1-5，相当于人为通过二次调频，抵消一次调频的作用，把本来应由本机承担的负荷变化转移到别的机组。这无疑增加了二次调频的负担，因而是一种不合理的考核方式。

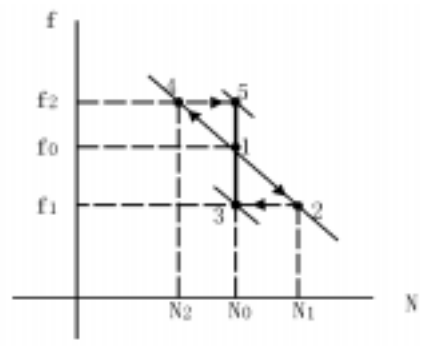


图 4

另外一种考核方式，也是压线运行，但对承担由于网频变化所引起的负荷变化予以鼓励。运行人员不需随时调整调速系统的给定值抵消一次调频作用。这是一种合理的考核方式，应当予以提倡。

6、 结论

1）随着电网容量的增大，电网中用户负荷变化对电网频率变化的影响相对减小，变化速度相对变慢，宏观地看，电网频率变得稳定，有充分时间进行二次调频，达到频率准确。

2）虽然庞大的旋转惯量有稳频作用，但它不能取代一次调频，由一次调频决定的电网静态调频特性仍然是电网频率稳定性的基础。

3）电网中不参加一次调频的机组越多，电网的自平衡能力越差。自平衡能力差的电网，二次调频任务加重，响应速度要加快。

4）再次强调，不投一次调频就是不投汽轮机调速系统，没有调速系统的机组，当发生小网运行工况时，将严重威胁机组和小网的安全。

5）DEH 的应用，为人为地退出一次调频提供了方便的条件，应制定合理的考核政策，限制 DEH 随意退出一次调频。

6）OPC 中的 103% 超速限制功能，不利于小网工况的稳定运行，应修改控制策略，限制其不利因素。



孤网调频问题探讨

杭州和利时自动化有限公司　刘康宁

摘要：本文推导出了电网等效转子方程，通过分析电网调频原理，指出了良好的一次调频性能是稳定电网频率的重要保障。指出了传统DEH调节系统的缺陷；提出了改进DEH一次调频性能的措施，并通过实际现场运行及甩负荷试验得到了有力的验证。

关键字：DEH　汽轮机　电网　一次调频

1、概述

电力系统的主要任务就是持续不断地为电力用户提供质量符合规范要求的电能。频率是供电质量的重要指标之一。国家规定额定供电频率为50Hz，频率允许偏差为±0.2Hz，对于小容量系统可放宽到±0.5Hz。实际供电频率与额定值的偏差反映了功率—负荷的平衡情况。当发电功率大于用电负荷时，随着旋转机械转速升高，供电频率也会增加。

用户负荷是随生产生活的需要而变化的。为了将电网频率控制在规定的范围内，电网中所有发电机发出的有功功率总和应与所有用电设备消耗的有功功率总和相平衡。在大电网下，因单台发电机组的功率占电网总功率的比例很小，对电网功率负荷平衡的影响很小，电网频率几乎不随单台机组功率变化而变。在孤立小电网下，发电机组输出的功率必须即时跟随用户负荷而变。

改变原动机的机械功率即可改变发电机输出的有功功率。汽轮机调速系统通过探测到转速的变化后，改变进汽调节阀的开度来改变发电机组的输出功率，最终缩小功率负荷不平衡量，达到稳定供电频率保障持续供电的目的。

在我国广泛使用的DEH控制系统技术，大部分是在80年代初期从美国西屋公司引进的。从DEH控制系统多年来的使用情况看，特别是近年来DEH控制系统在小电网中的大量使用，暴露出了一些问题。我们为解决孤立电网频率稳定问题，经仔细分析电网调频原理及仿真计算，指出了传统DEH控制系统的不足及改进措施，并在实践中得到了有力的验证。

2、电网调频原理

在锅炉中通过燃烧煤炭释放出热能。水在锅炉中吸收热能后，转化为过热蒸汽。具有热力势能的过热蒸汽进入汽轮机后膨胀做功，将热力势能转换为驱动发电机组转子的机械功率。发电机再将机械功率转换为电磁功率。做功后的低能蒸汽在凝汽器中凝结成水。给水泵将水再打入锅炉，强制形成连续循环，使发电机组可连续地生产出电能。如图1所示。

汽轮机的机械功率正比于其进汽流量。而流量又正比于蒸汽压力与进汽阀门有效开度之积。因此，改变阀门开度或蒸汽压力，即可改变机械功率。前者称为定压调节方式，后者称为滑压调节方式。汽轮机调节系统通过改变调节阀开度，使功率负荷达到平衡，最终达到稳定供电频率的目的。

供电频率与电网中旋转机械的转速相对应。

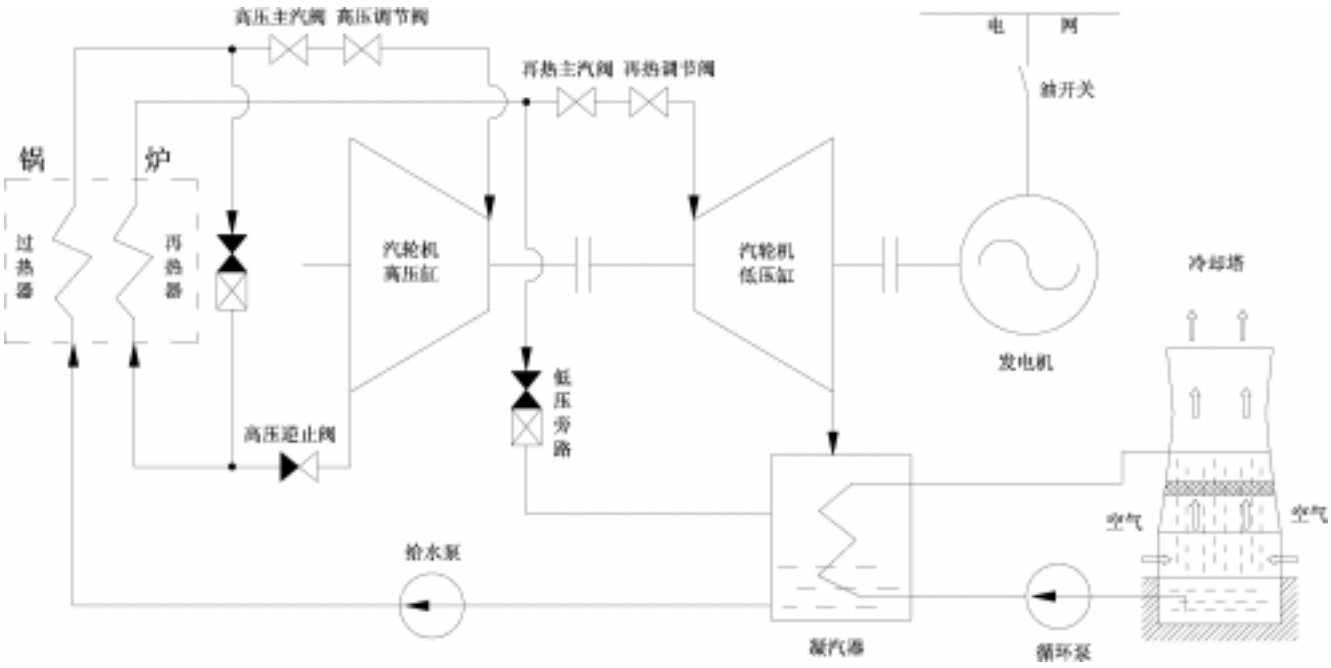


图1 火力发电厂热力循环示意图

2.1 发电机组转子方程

不妨将发电机转子简化为刚性转子，机械功率NT与电磁功率NG和损耗功率NTW之差对机组转子做功。由牛顿经典力学定律可得机组转子运动方程式（2－1）。

$$\frac{1}{2}J_T\frac{d\omega_T^2}{dt}=N_T-N_G-N_{TW} \qquad \text{式（2－1）}$$

式（2－1）中：J_T为发电机组转子的转动惯量，ω_T为发电机组转子的角速度。

用转子的额定角速度ω_e和发电机的额定功率N_{Ge}对式（2－1）进行归一化处理得式（2－2）。

$$\frac{1}{2}T_a\frac{d\overline{\omega}_T^2}{dt}=\overline{N}_T-\overline{N}_G-\overline{N}_{TW} \qquad \text{式（2－2）}$$

式（2－2）中：T_a为转子时间常数，$\overline{\omega}_T$、$\overline{N}_T$、$\overline{N}_G$、$\overline{N}_{TW}$分别为发电机组的归一化角速度、机械功率、电磁功率、损耗功率。

对式（2－2）在额定工作点附近进行线性化处理后可得转子方程式（2－3）。

$$T_a\frac{d\varphi_T}{dt}+\beta_T\varphi_T=\mu+\psi(t) \qquad \text{式（2－3）}$$

式（2－3）中：φ_T归一化转速的变化量，β_T为转子的自平衡系数，μ为归一化等效总

阀位给定值的变化量，ψ为归一化电负荷量。

转子时间常数T_a由式（2－4）给出。

$$T_a=\frac{J_T\omega_e^2}{N_{Ge}} \qquad \text{式（2－4）}$$

转子的自平衡系数β_T由式（2－5）给出：

$$\beta_T=\left(\frac{\partial\overline{N}_{TW}}{\partial\overline{\omega}_T}-\frac{\partial\overline{N}_T}{\partial\overline{\omega}_T}\right)_e \qquad \text{式（2－5）}$$

2．2 电网等效转子方程

为了提高供电的可靠性，通常将各个发电厂、变电站通过超高压输电线路连接起来，组成一个容量很大、地域很广的电网。如图2所示。电网中各个发电机组输出的功率相互支援，随着电网容量的增大，电网功率负荷不平衡量相对减小。因此电网容量越大供电频率稳定性越好。

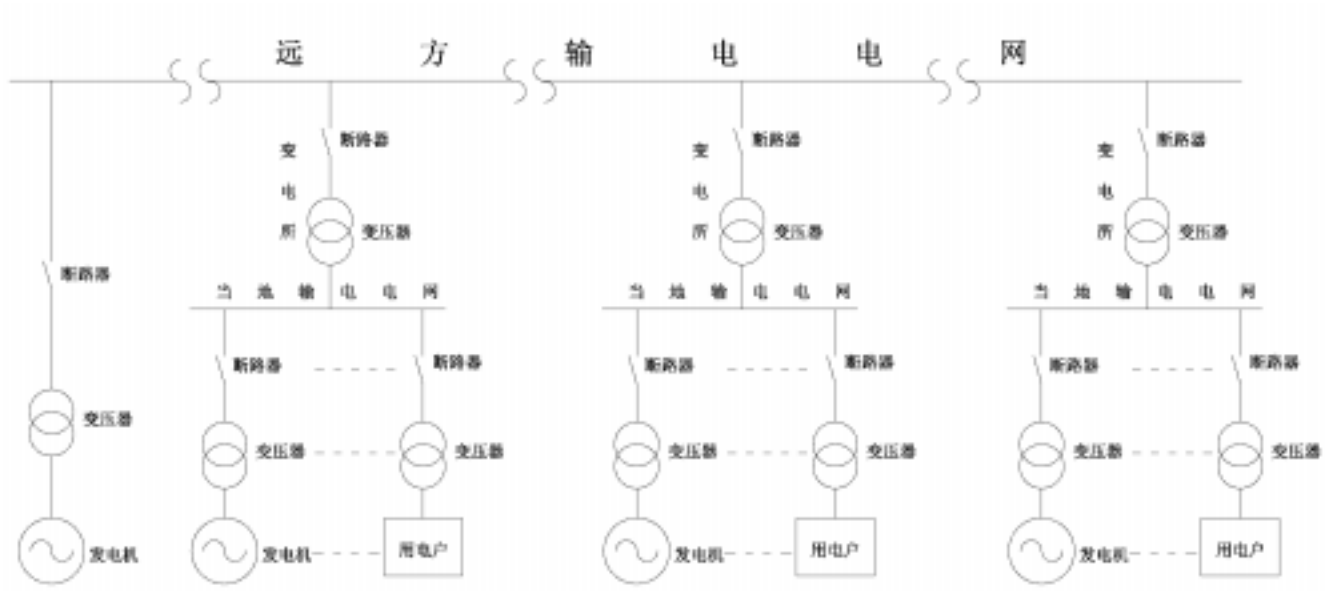


图2 电网结构示意图

在此将用电设备分为具有旋转蓄能作用的设备（如电动机拖动系统）和没有旋转蓄能作用的设备（如电解铝设备）两部分。拖动系统吸收的电磁功率除消耗在拖动负载及损耗上外，多余的功率将使拖动系统动能增加。一个电网中所有发电机输出的电磁功率总和等于各种用电设备消耗的功率总和。将各发电机组转子方程式（2－1）累加后得式（2－6）。

$$\frac{1}{2}\Sigma\left(J_{Tk}\frac{d\omega_{Tk}^2}{dt}\right)=\Sigma\left(N_{Tk}-N_{TWk}\right)-\Sigma\left(N_{Di}+\frac{1}{2}J_{Di}\frac{d\omega_{Di}^2}{dt}\right)-\Sigma\left(N_{Cj}\right) \qquad \text{式（2－6）}$$

式（2－6）中：N_{Di}、J_{Di}、ω_{Di}分别为C_{Di}为第i台拖动系统负载消耗的功率、转子的转动惯量和转子的角速度，NCj为第j台非蓄能设备消耗的功率。

用各旋转机械的额定角速度、各设备的额定功率以及各发电机额定功率的总和对式（2－6）进行归一化处理后得式（2－7）。

$$\frac{1}{2}\Sigma\left(C_{Tk}T_{ak}\frac{d\overline{\omega}_{Tk}^{2}}{dt}\right)=\Sigma C_{Tk}\left(\overline{N}_{Tk}-\overline{N}_{TWk}\right)-\Sigma C_{Di}\left(\overline{N}_{Di}+\frac{1}{2}T_{Di}\frac{d\overline{\omega}_{Di}^{2}}{dt}\right)-\Sigma\left(C_{cj}\overline{N}_{cj}\right)$$

式（2－7）

式（2－7）中：T_{ak}、T_{Di}分别为各发电机组、拖动系统的转子时间常数，$\overline{\omega}_{Tk}$、$\overline{\omega}_{Di}$为各转子的归一化角速度，$\overline{N}_{Tk}$、$\overline{N}_{TWk}$、$\overline{N}_{Di}$、$\overline{N}cj$为各种归一化功率，C_{Tk}、C_{Di}、C_{cj}为各设备额定功率占电网总额定功率的比值。

在本文讨论的范围内可以认为，电网的供电频率在一个电网内各处是相等的。发电机组以及各拖动系统的归一化角速度均与归一化供电频率相等。对式（2－7）在额定工作点附近进行线性化处理后可得转子方程式（2－8）。

$$T_W\frac{d\varphi_W}{dt}+\beta_W\varphi_W=\Sigma\left(C_{Tk}\mu_k\right)+r(t)$$

式（2－8）

式（2－8）中：T_W为电网等效转子时间常数，φ_W为归一化电网频率的变化量，β_W为电网等效转子的自平衡系数，μ_k为第k台发电机组归一化等效总阀位给定值的变化量，r为归一化电网功率负荷扰动量。

电网等效转子时间常数T_W由式（2－9）给出：

$$T_W=\Sigma\left(C_{Tk}T_{ak}\right)+\Sigma\left(C_{Di}T_{Di}\right)$$

式（2－9）

电网等效转子的自平衡系数β_W由式（2－10）给出：

$$\beta_W=\Sigma\left(C_{Tk}\beta_{Tk}\right)+\Sigma\left(C_{Di}\frac{\partial\overline{N}_{Di}}{\partial\varphi_W}\right)_e+\Sigma\left(C_{Cj}\frac{\partial\overline{N}_{Cj}}{\partial\varphi_W}\right)_e$$

式（2－10）

归一化电网功率负荷扰动量r由式（2－11）给出：

$$r=\frac{\Delta N}{\Sigma\left(N_{Gek}\right)}$$

式（2－11）

式（2－8）中ΔN为电网功率余缺量。

2．3 分析

汽轮发电机组在升速期间，发电机输出功率为零。由式（2－2）知，汽轮机蒸汽产生的机械功率与损耗功率的差对转子做功。损耗功率约为10％左右。虽然通常转子时间常数仅5～10秒、

自平衡系数仅0.6左右，转子的自平衡能力很差。但在正常情况下，由于损耗功率及蒸汽压力的扰动量很小，有的机械液压调节系统，在2700r/min以下转速开环调节，也能控制住机组转速。因此完成将转速平稳地升到额定转速的任务，对于调节系统性能的要求并不高。

在发电机的主油开关跳闸时，发电机输出电磁功率突然降为零。由式（2－2）知，该发电机组转子会以极大的加速度升速。最大加速度可达300～600r/min/s。为了将最大超速限制在规定的范围内，必须迅速将机械功率减小。若调节阀关闭延迟0.1s，转速将多升高数十转。

在并网状态下，由式（2－7）知，发电机组产生的功率总和与各种负载消耗的功率总和之差对等效转子做功。而且由式（2－9）、（2－10）知，电网等效转子时间常数及自平衡系数比单台机组的大。T_W的典型值为10～20秒，β_W约为1.6～3.6。对于大电网，由于各单台设备的功率比率很小，而且各设备的启停具有一定的随机性。电网频率基本不随单台机组功率变化。因此在正常情况下，单台机组的调频性能对电网频率的影响不是很明显，电网频率很稳定。

对于孤立小电网，由于各单台设备的功率比率较大，通常功率负荷的扰动量相对值也较大，因此在正常情况下，也需要性能优良的一次调频功能，使发电机组输出的功率即时跟随电网负荷需要而变化，才能维持电网频率稳定。单台发电机组输出功率的变化，将对电网频率产生明显影响。

在电网中某台发电机组跳闸时，电网突然失去该机组输出的功率。对于大电网，由于通常发电机功率比率小于8%，在一次调频功能的作用下，利用锅炉的蓄能，即可将电网频率维持在规定的50±0.2Hz以内。对于孤立小电网，由于通常发电机功率比率较大，剩余机组锅炉的蓄能以及发电机出力限制，不足以弥补功率的不足，电网频率可能迅速降低。为了避免发生频率崩溃，必须即时启动低周减载，切除部分负荷。

在某大型设备启动时，系统必须储备有足够的热备用能量，并且确保能够即时释放出来，才能维持频率稳定。可采用提高蒸汽参数、提高电网频率及调节阀预留足够开度等措施。

当电网线路开关跳闸时，可能将局部电网从大电网中分裂出来形成孤立电网。通过线路开关的功率突然消失，此局部电网可能功率过剩，也可能功率不足。此时对局部电网的冲击最大，若调节系统性能不良，极易造成全网停电的事故。

2．4 电网调频过程

电网调频过程是电力生产与消费能量的平衡过程。电网负载消耗的总功率为一种时变随机过程。总负荷变化量随着变化周期时间由短到长，而显著增大[1]。为了维持电网频率稳定，必须设法使发电机组生产的总功率即时跟随电网总负荷变化。

可将电网调频分为以下三个阶段[2]：

1）自然调频：定义为调速系统未动作时，仅靠自平衡能力来稳定电网供电频率的过程。当电网出现功率负荷不平衡后，电网中旋转机械的动能会随着电网频率的变化而变化，因此可吸收或释放部分能量来补偿系统能量的变化，同时用电设备的负荷也会随电网频率的变化而变化，从而可减缓供电频率的变化。

自平衡能力由等效转子时间、自平衡系数来衡量。由于孤立小电网及发电机组的自平衡能力较弱，需要良好的一次调频性能才能维持转速的稳定。

2）一次调频：定义为在调速系统给定值不变的情况下，通过转速反馈作用修正调门开度，改变汽机输出功率来调整电网的频率。在电网频率按自然调频过程变化的同时，调节系统探测到机组转速的变化后，通过转速反馈作用迅速调整各发电机组的输出功率，以维持供电频率稳定。

在加负荷方向它需要利用锅炉蓄能的支持，可设置一定的限制，以防止拉跨锅炉。出现功率不足，频率下降过低时，应利用低周减载装置，避免发生频率崩溃。在减负荷方向，为了避免机组发生事故，禁止设置任何限制。

自然调频和一次调频是相继发生的，在孤网运行方式下，如果一次调频的灵敏度差，速度跟不上，将会使孤网的频率发生大幅度波动或震荡，以至于频率崩溃。

DEH良好的一次调频性能快速性和灵敏度，是机组安全运行及电网频率稳定的保障。

3）二次调频：定义为通过改变调频机组调速系统的给定值，改变其输出功率使电网频率回到额定值。在一次调频作用后，最终稳定频率会偏离额定值。需通过调整预先指定的调频机组的负荷设定值，使各机组的负荷变化量转移到调频机组上，同时将频率恢复到额定值。

并不是调频机组才承担一次调频任务，所有机组都应具有良好的一次调频能力。现在还有许多人认为只有调频机组才需承担调频任务，基荷机组不承担调频任务，因此仅调频机组需投入一次调频功能。这种思想是完全错误的。由于发电机组的自平衡能力很弱，每台机组的转速反馈即一次调频功能随时都应投入，才能保证安全运行。

3、传统DEH调频问题

1）在升速阶段，给定转速与实际转速之差经PID调节后控制油动机行程。根本没有使用一次调频转速反馈回路，因此在升速阶段不能考验一次调频的性能。

2）在油开关合闸期间，进入阀控、功控方式下才具有一次调频功能。由于大电网的频率本身就比较稳定。机组在正常运行期间也难以考验一次调频的性能。

3）在一次调频回路中，由于种种原因，通常人为设置了较大的死区以及不当的限幅作用。限制了一次调频的作用范围。

4）通常人为设置了转速大于103%OPC功能。极易引起系统振荡。

5）离散控制系统特有的采样处理、信号传递延迟等。过长的信号延迟时间，可造成了一次调频性能变差，甚至不稳定。

6）甩负荷试验是验证汽轮机控制系统性能常用的方法，而在进行传统甩负荷试验时，因DEH接收发电机油开关跳闸信号后，切换到了转速PID调节系统，因此甩负荷试验未能验证到DEH的一次调频性能。在OPC作用下，油动机的快速关闭时间，不是油动机的时间常数。

4、改进措施

1）缩短信号延迟时间

仿真分析得知，缩短DEH控制系统的信号延迟时间，可改善一次调频动态响应。建议将DEH控制系统一次调频转速反馈回路算法独立出来，组成一个快速调节任务。也可通过将测速模件输出的转速信号，经过适当处理，送到伺服模件，实现快速硬件转速反馈作用，

2）增加转速微分修正

仿真分析得知，在一次调频系统中加入适当的转速微分调节作用，可明显改善动态响应。建议将测速模件输出的转速微分信号直接连接到伺服模件，实现硬件转速微分调节作用。

3）减小油动机时间常数

仿真计算得知，减小油动机时间常数可改善动态响应。可通过适当增大伺服控制系统的开环放大倍数来减小油动机时间。由于常见的为积分型油动机，建议采用比例调节式伺服控制器，这样可有效减小油动机时间常数。

4）缩小一次调频死区

仿真计算得知，过大的一次调频死区会降低频率的稳定性。建议将一次调频死区设为±2r/min。

5）取消一次调频限幅

为避免机组超速，建议取消关调节阀方向的任何限制。而在加负荷方向上可设置适当的限制。

6）修改超速限制

因103%超速限制功能易引发系统振荡，最终造成全网停电建议取消，或在短时间内只能动作一次。

由于电网发生甩负荷时，油开关并不一定跳闸，因此不能单靠油开关跳闸信号使OPC电磁阀动作来限制机组超速。建议利用加速度大动作OPC电磁阀来抑制甩负荷飞升转速。

7）测定静态特性

调节系统不等率对一次调频的大小及系统的稳定性起作重要作用。建议通过带负荷试验测量出每套DEH调节系统实际的静态特性曲线。

8）测定信号延迟时间

DEH的信号延迟时间大小对系统的稳定性起作重要作用。建议试验测量出DEH系统输入信号与输出信号间的延迟时间。

9）修改甩负荷试验步骤

机组在3000r/min空负荷运行时，设法投入DEH的一次调频功能，观察机组转速是否稳定。

在试验前设法屏蔽掉送到DEH系统的油开关状态信号，避免其在甩负荷试验时发生变化。利用加速度大OPC功能限制机组超调量。

其余按常规步骤进行甩负荷试验。

进行甩负荷带厂用电试验。

5、结论

改进后的DEH一次调频性能优良，可提高电网频率的稳定性。在电网发生发电机组跳闸、输电线路跳闸等故障时，发电机组可自带厂用电，为保障设备安全、缩短恢复电网供电的时间创造了有利的条件。因此对企业可带来巨大的经济效益。

稳定电网频率的关键点是：

1）DEH一次调频响应迅速

2）发电机组留有足够的热备用，否则应即时甩掉部分负荷。

参考文献

[1] 于达仁,郭钰锋.一次调频的随机过程分析.中国电机工程学报.2002.6

[2] 罗作桢，刘康宁.关于电网调频问题的探讨.电厂自动化.2002.4

霍煤铝电孤网运行成功

刘康宁 罗作桢 纪云峰

2004年12月25日上午，内蒙古霍煤鸿骏铝电公司自备电厂首台发电机组一次启动成功，并在12月25日下午开始单机接带铝厂负荷。经过数天单机带负荷25MW试运行，证明DEH控制系统完全能适应孤网运行下铝厂负荷的波动，供电频率即机组转速控制平稳，霍煤电厂、吉林电建、吉林调试所等参加建设的人员都很满意。

1、工程特点

霍煤电厂位于内蒙古霍林河市。一期工程建成2台50MW、2台100MW发电机组，其DCS及DEH控制系统均由和利时公司提供。生产出的电能向霍煤集团内部的铝厂供电。由于受到电力政策等限制，目前这4台机组只能孤网运行。

启动电源由东北电网通过220KV线路经过120MVA联络变压器接至电厂110KV母线。规定用电负荷不允许超过50MW，且自备电厂的发电机组不能并网运行。

电解铝生产采用霍尔——埃鲁特熔盐电解法。阳极效应是熔盐电解的特有现象，并具有一定的突发性。发生阳极效应时，电解槽电压由4.2V急剧升高达20～40V，而由于整流机组的恒流控制作用，其电流仍维持在300KA左右，因此用电负荷会突然增大约6～12MW，持续一段时间后，经人工干预突然消失。

在大电网情况下，由于大电网的自平衡能力较强，且功率、负荷相对扰动量通常很小，因此电网频率较稳定。单台发电机组或负载的功率变化对电网供电频率的影响很小，发电机组的转速基本稳定在3000r/min。发电机组功率仅由本机组蒸汽参数、阀门开度决定，而与负载无关。

但是，在孤网运行的系统中情况大不一样，发电机的出力必须随时跟随负载功率的变化而变，才能维持供电频率恒定。若发电机组的容量大于电网总容量的8%，且未与其它电网相连，则可认为此电网为孤立小电网。

对于孤网运行情况，当负荷变化时，会引起孤网频率变化。由于孤立电网的自平衡能力很差，发电机组必须具备良好的一次调频性能，才能保障孤网频率稳定。还需要及时通过二次调频作用，才能将频率维持在规定的范围内。

带铝电负荷的孤立电网，若发电机组故障，在机组能安全停机后，应迅速连接国家电网，待故障处理完后尽快启动发电机组，重新接带铝厂负荷。在发电机组处理故障期间，利用国家电网电力向铝厂供电维持电解液温度，防止凝结损坏电解槽。

铝、电生产过程仍需密切配合，统一指挥，互相适应，互相协调。

2、改进的DEH控制系统

近年来，随着传统DEH控制系统在电网中大量使用，暴露出了以下问题：

1）孤立电网频率波动较大，不稳定。

2）当电网故障将局部电网从大电网中分裂出来时，可能发生频率反复大幅度波动，造成局部电网全部停电。

为了稳定孤立电网频率，保障电网安全可靠运行，我们详细分析了电网调频原理，建立了电网调频等效转子模型。通过仿真计算分析，对传统DEH控制系统提出了以下改进措施，如图1所示。

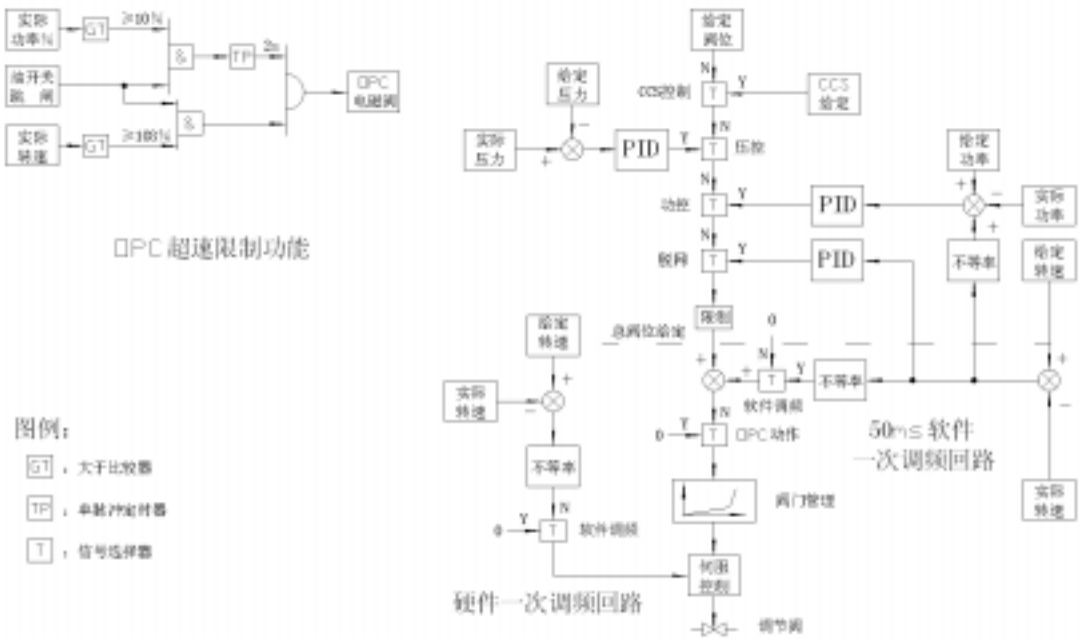


图1 改进的DEH控制系统框图

3）缩短调节周期

缩短软件一次调频转速反馈闭环回路算法的调度周期。

4）增加硬件一次调频

将转速信号通过新开发的一次调频板，直接引到伺服板，组成硬件一次调频回路。软、硬件一次调频回路可相互切换。

5）一次调频功能改为全范围均起作用

将转速偏差比较对象由3000r/min改为给定转速。无论在升速阶段还是在油开关合闸期间，一次调频转速反馈均起作用。

6）一次调频限制

一次调频死区设为±2r/min，且不限幅。

7）修改OPC功能

在油开关合闸期间，禁止103%超速限制功能，以免发生电网频率反复波动。

升速阶段在原转速PID控制的基础上加入一次调频调节，与常规控制相同转速仍为无差调节，在升速阶段即可检验一次调频的稳定性。

在发电机主油开关合闸带负荷后，采用阀控方式。由一次调频功能的转速反馈控制供电频率。在孤网运行时，由于机组功率必须随电网负荷变化，不宜采用功控、压控方式。否则会影响孤网频率稳定性。

3、实际运行情况

下面列出了霍煤电厂首台机组的启动升速过程、发生阳极效应过程及功率缺失甩负荷过程的历史趋势曲线。

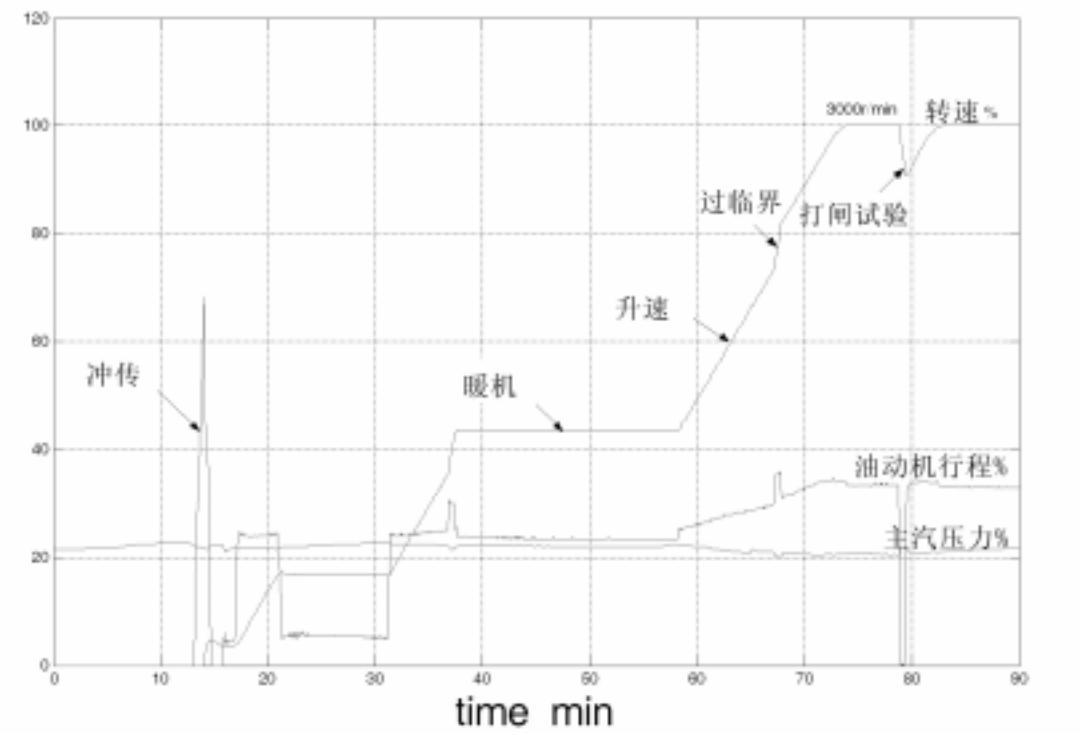


图2 升速曲线

从图2可以看到：刚开始调门开得很大，油动机开到68%时，主汽压力为1.8MPa，汽轮机开始冲转，转速迅速升高同时油动机行程迅速下降，然后继续升速。在500、1300r/min设置了两个暖机点，升速过程平稳，在暖机点及3000r/min定速期间转速波动非常小。一次调频的转速反馈作用很明显。

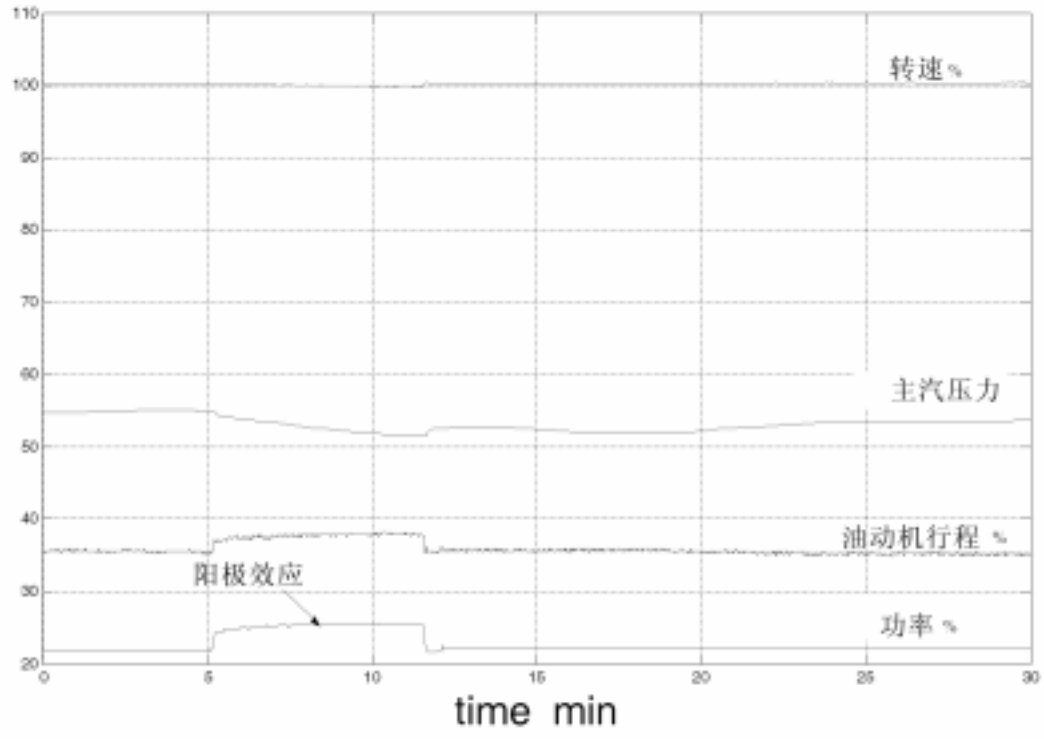


图3 阳极效应曲线

从图3可以看到：发生阳极效应前功率为21.8MW，转速为3010r/min，主汽压力为4.8MPa。阳极效应期间负荷升到25MW，转速降为3004r/min，主汽压力为4.7MPa。阳极效应持续了6分30秒。阳极效应消失前功率为25MW，转速为3001r/min，主汽压力为4.5MPa。阳极效应消失后功率为21.5MW，转速为3011r/min，主汽压力为4.6MPa。

从图4可以看到：开始按习惯的运行方式，为减小调节阀节流损失，主汽压力设置得较低，油动机行程较大。开始功率为19.7MW，转速为3017r/min，主汽压力为5MPa，油动机升程为55.9%。随着功率增加，在一次调频转速反馈的作用下，油动机升程也迅速增加。但由于阀门通流能力余量太小，功率升到21.2MW，转速降到2972r/min时，油动机升程已达100%。负荷继续增加，转速则迅速下降，到负荷为22.8MW、转速为2505r/min时，发生油开关跳闸。由转速PID控制，最终将转速调节到3000r/min。

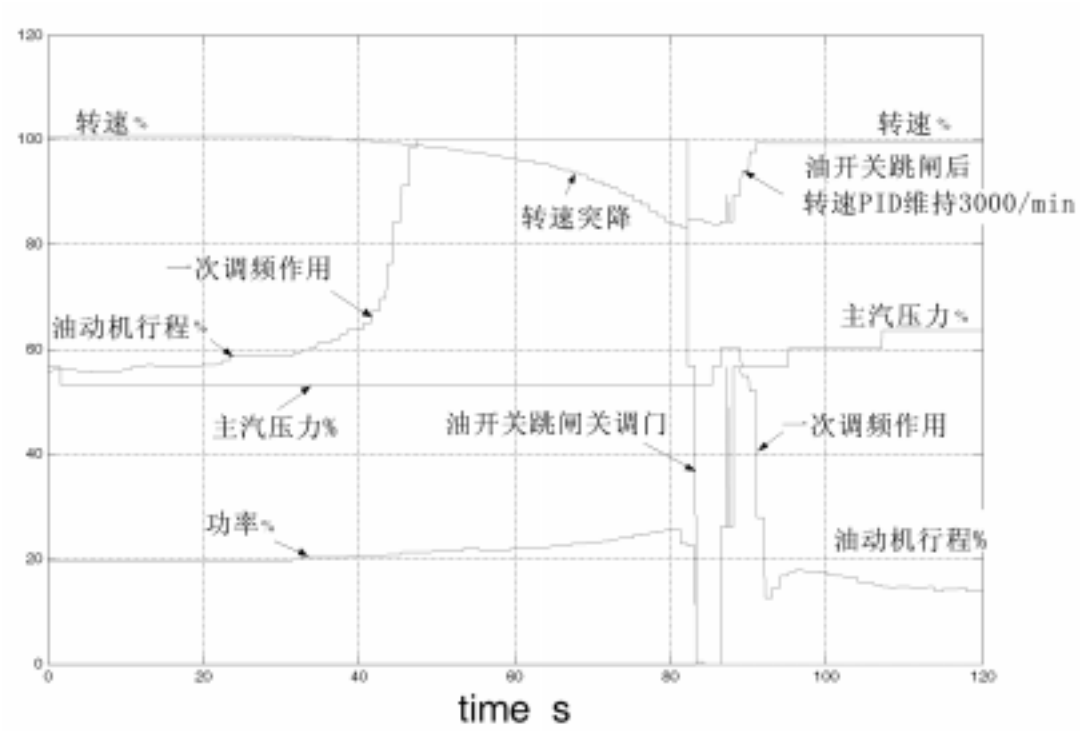


图4 功率缺失甩负荷曲线

4、结论

传统DEH控制系统经上述改进后，有效提高了一次调频的性能。机组转速响应迅速、控制稳定，完全能满足霍煤孤网运行的要求。在正常运行时，能维持孤网频率稳定。只要预留足够的热备用余量，就能承受阳极效应引起的负荷冲击。

上述改进方案不但适应孤网运行环境，而且也适应大网运行环境。DEH控制系统改进后，可保障从大电网分裂出来的局部电网的安全运行。避免局部电网大面积停电。

DEH 系统一次调频功能实践

杭州和利时自动化有限公司　　刘康宁　纪云锋

摘要：本文探讨了DEH 系统一次调频功能原理，根据内蒙霍煤鸿骏铝电公司电厂孤网运行特点，采用软件一次调频和硬件一次调频两种方式，成功地完成了孤网运行的调频任务。

关键词：DEH 系统　孤网运行　一次调频

1 、前言

随着中国经济的快速发展，各地民营企业规模不断扩大，为了提高经济效益，很多钢铁、化工、造纸、水泥、电解铝、制糖等行业纷纷建立自备电厂。由于这些机组容量较小，电气系统设计不完善，经常会发生与大电网脱离的情况，甚至根本不并入大电网而长期“孤网运行”。由于小网和厂用电系统容量小，几乎没有旋转备用余量，因此系统稳定性差，其频率调节一直是一个难题，往往是小网频率大幅波动，最终频率崩溃，全厂停电。频率的波动和电力的丧失会造成生产的严重损失，甚至昂贵设备的报废。内蒙霍煤鸿骏铝电公司电厂孤网运行要求电厂机组能根据铝厂的用电需求提供足够的电能，不会因负荷的变化而影响电压和频率，使铝厂能根据自己的工艺要求进行生产。由和利时公司提供的DEH 控制系统实现该机组一次调频功能，成功地完成了孤网运行的调频任务。

2 、电厂机组简介

电厂的4 台机组都为武汉汽轮机厂生产的N50/N100-8.83/535 型汽轮机，#1、#2 机组采用循环流化床锅炉，#3、#4 机用由煤粉汽包炉供汽，使用高压抗燃油DEH 系统。

机组装有两套相互独立的超速保护通道：

双通道机械式飞环危急遮断器：危急遮断器动作，可泄掉低压安全油，进而通过隔膜阀泄掉高压安全油，关闭主汽门和调速汽门遮断机组进汽。

110% 超速保护装置：由ETS 发出的遮断信号动作电磁解脱器和4 个AST 遮断电磁阀，分别泄掉一次安全油和二次安全油，关闭主汽门和调速汽门遮断机组进汽。

其发电机侧所带的电网结构如图1 所示：

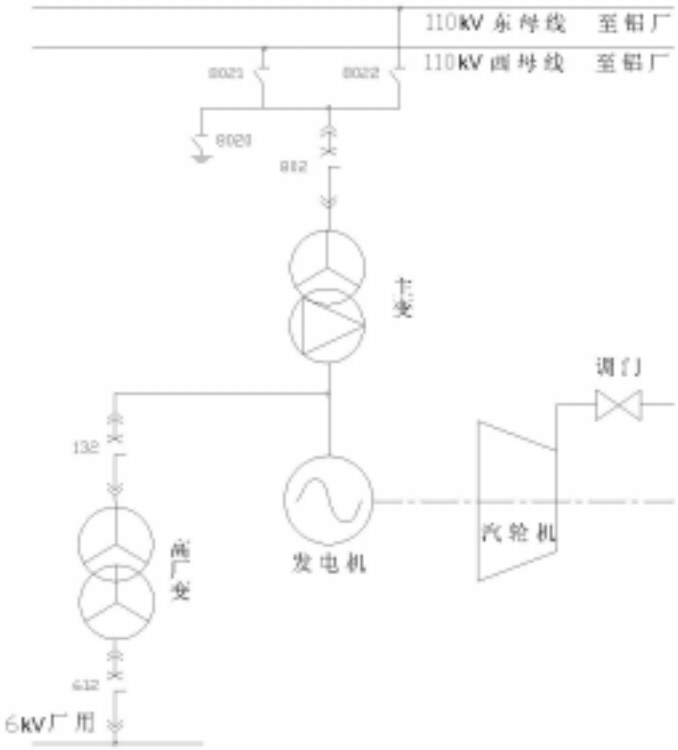


图1　电网结构图

3、一次调频原理及有关技术参数

一次调频功能主要是根据电网频率的变化，按照一次调频预定的曲线，对机组负荷进行调整，其核心是在电网负荷发生变化的时候，利用锅炉蓄能，根据转速变化调整汽机功率，以达到在有限频率变化的前提下实现功率与负荷平衡。其原理如图 2 所示：

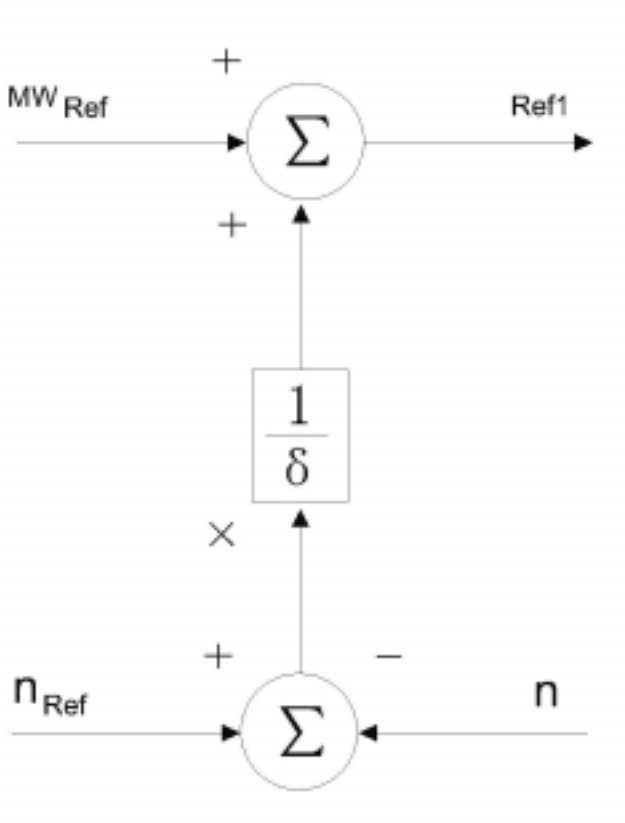


图 2 一次调频原理图

按照电网的要求，原则上 DEH 系统应当在油动机全行程范围内参与电网调频，但是由于发电机组本身的问题或一些特殊要求，可以对调频功能做部分限制，当网频下降时，机组能提供的最大功率增量为由当前功率至最大功率；当网频升高时，机组功率允许减小到机组本身允许的最低功率，直到空转功率。一次调频的主要技术参数如下：

1）机组不等率一般设为 $\delta = \frac{150}{3000} = 5\%$ （可根据机组的具体状态和特点修改）；

2）机组一次调频的功率补偿量（ΔP）由机组转速不等率 δ 和电网频率偏差（可转换为转速偏差 Δn）计算出来的，公式如下：

$$\Delta P = \frac{\Delta n / n_0 * 100\%}{\delta} * P_n$$

其中：n_0 ——额定转速　　P_n ——机组的额定功率

3）一次调频死区

原则上应不设死区。

为了减少机组的调整频度，当电网频率基本稳定在额定值时，允许机组对频率的微小变动不产生调节作用，因此在额定转速附近设置了死区。死区大小应在迟缓率允许的范围内，本例设为±2rpm，即机组转速在2998r/min到3002r/min的范围内，一次调频不动作，即ΔP=0。超出这个范围区域称为一次调频动作区域，见图3所示。

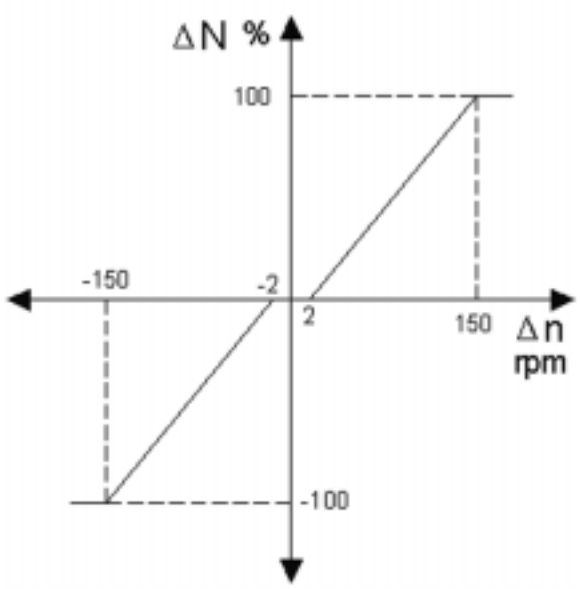


图3 一次调频不灵敏区的静特性

4、一次调频功能的实现

我们采用两种一次调频方式来实现铝电厂的孤网运行，即软件一次调频方式和硬件一次调频方式。软件一次调频方式通过软件组态控制逻辑，来实现系统的功能，该方式具有可根据机组运行需要方便修改的特点；硬件一次调频方式直接通过一次调频模块快速、稳定地输出动态负荷补偿，以硬件的方式稳定电网的频率，两种方式可以相互切换。

4.1 软件一次调频

软件一次调频将给定转速和实际转速比较，得到转速偏差信号，以调节调门的大小，控制机组负荷增减，维持频率恒定。其控制原理如图4所示：

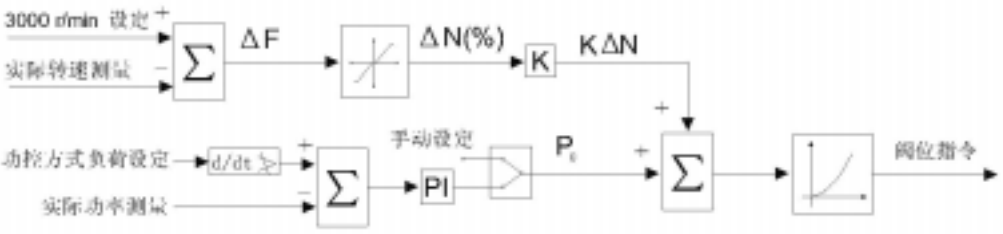


图4 软件一次调频原理

由上图可知，ΔF为频率变量，ΔN为对应频差ΔF的负荷补偿量，K为放大倍数，相当于机组的速度变动率的倒数，其数值可根据电厂的要求进行修改。$K\Delta N$值的大小，决定了电网频率

变化时机组负荷的相应变化量，当ΔF大于0，则表示电网频率低于50Hz，$K\Delta N$亦大于零。$K\Delta N$和负荷指令P_0相加，使阀位指令增加，机组出力就增加一定量。反之。当ΔF小于0，则在P_0基础上减去$K\Delta N$值，使阀位指令减小，机组出力就减小一定量。图5和图6分别为使用软件一次调频的单机和小网带负荷运行曲线图，从图中可以看出，负荷和主汽压力的变化都反映到机组的频率上，负荷增加，机组频率减小，通过一次调频作用开大阀位，恢复机组频率，反之，当负荷减小，频率升高，一次调频作用减小阀位，降低机组频率；同样，当主汽压力升高，机组出力大于实际需要的负荷，机组转速升高，通过一次调频关小阀位，使机组出力等于实际需要的负荷，转速回落。

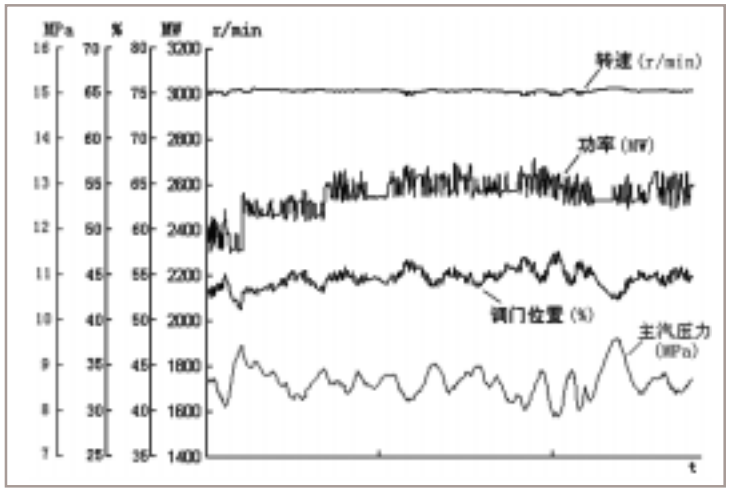


图5 #3机组单机带负荷曲线

图5录入了#3机组单机带负荷的曲线，其中负荷波动：57.5～67.86MW，主汽压力波动：7.87～9.6MPa，调门在45.5%～51.1%内调节，转速在2990～3025rpm变化。数据曲线表明：尽管负荷和主汽压力在比较大的范围内波动，通过一次调频作用，可以将转速维持在较小的范围内波动。

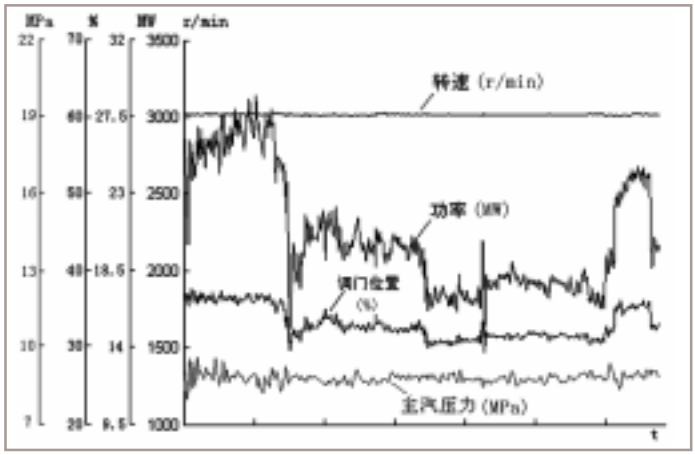


图6（a） #2机组小网带负荷曲线

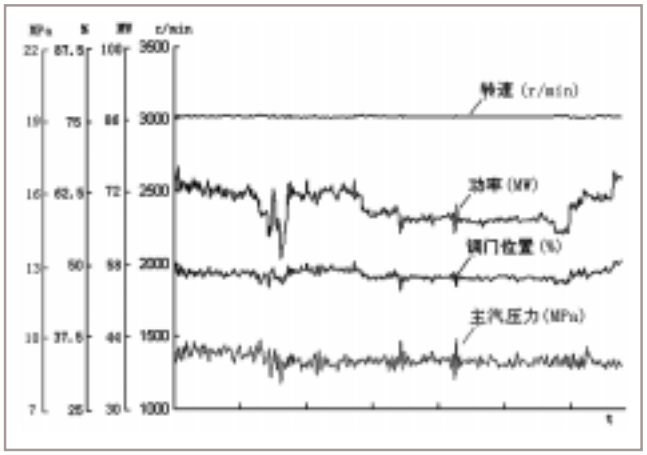


图6（b） #3机组小网带负荷曲线

图6（a）和图6（b）录入了#2和#3机组组成小网的带负荷曲线图，从图中可以看出，在组成小网运行后，两台机组同时参与一次调频，频率控制更加稳定，即使在当铝厂突然减掉25MW负荷后，转速也没有出现大幅的升高。

4.2 硬件一次调频

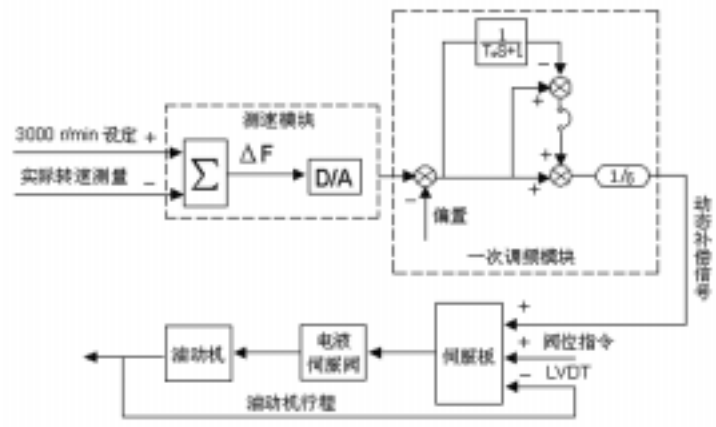


图7 硬件一次调频原理

硬件一次调频即采用一次调频模块（FM165），接受测速模块FM163C的模拟转速偏差信号，经高选放大、修正之后，将动态补偿信号输出到FM146伺服模块，从而实现汽轮机DEH系统的调速器功能，使汽轮机获得符合发电控制要求的静特性，保持电网频率稳定。其控制原理如图7所示

图8为使用硬件一次调频的曲线图，正常时主汽压力在8.3Mpa左右，铝厂负荷为22.5MW，转速为3000转/分，当发生阳极效应时，负荷增大到26.50MW，转速开始下降，通过一次调频板的作用，使阀门位置从37%增加到40%左右，使转速维持在2994转/分左右，阳极效应过后，转速又恢复到3000转/分。当主汽压力降低到7.0Mpa后，调门开大到44%，仍然保持转速稳定。

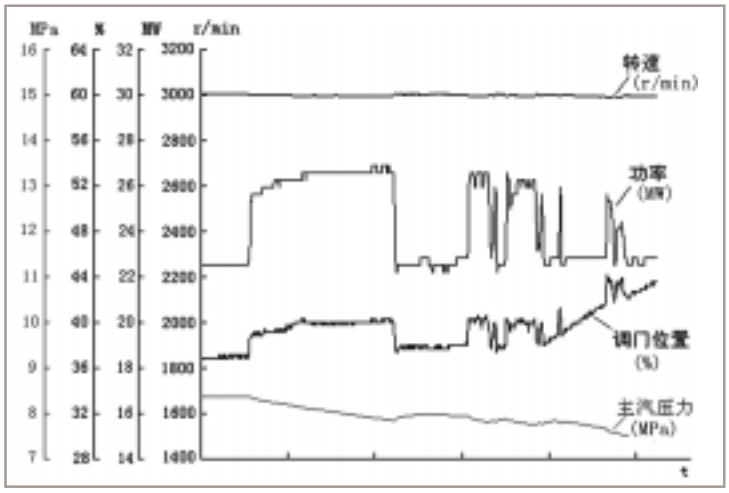


图8 硬件一次调频带负荷曲线

5、结论

1）机组一次调频功能模仿了原机械液压系统调频的动作过程，但增加了死区的限制，这样，即保证了电网周波大幅度波动时，一次调频快速动作增、减机组负荷的要求，又防止了一次调频频繁动作对机组正常控制的扰动；

2）根据机组不同工况和电网负荷波动情况，灵活应用软件一次调频易于组态修改和硬件一次调频响应快、动态特性好的特点，从单机和小网接待负荷运行情况看，能满足孤网运行的要求，较好地适应铝厂阳极效应带来的负荷波动；

3）对于带小网和厂用电的系统，其稳定性差、频率调节难，对调频控制要求高，目前国内带小网和厂用电成功的案例极少。本例推荐的一次调频方案，成功地解决了带小网和带厂用电问题，可以作为范例。今后还须不断研究合适的控制系统和理想的控制策略，完善机组的调频功能。

霍煤铝电一次调频总结

杭州和利时自动化有限公司　　纪云锋

1、前言

内蒙霍煤鸿骏铝电公司孤网运行，要求电厂机组能根据铝厂的用电需求提供足够稳定的电能，在冲击负荷的影响下保持稳定的供电电压和频率，使铝厂能根据自己的工艺要求进行生产。其发电机组的DCS系统和DEH系统均采用了我公司的MACS III系统设备。为适应孤网运行要求，DEH应用了最新开发的一次调频板和软件一次调频控制策略，在实际应用中取得了令人满意的效果，积累了孤网运行的经验，也为后续两台15万机组的投标创造良好的机遇。

经罗老师的关心指导，和刘老师亲临现场调试，目前＃2机组（50MW）和＃3机组（100MW）已投入单机试运行。

2、概述

霍煤铝电机组为武汽N50/N100-8.83/535型汽轮机，流化床锅炉，母管制运行，使用高压抗燃油DEH液压系统。

孤网运行特点：

因为铝厂供电系统与主网联系薄弱，发电机组的供电与铝厂负荷直接对应，成为独立电网。此时DEH控制的汽轮机不仅承担平衡电网负荷的任务，而且是稳定电网频率的唯一手段。这里负荷只取决于铝电公司的用户，DEH的任务是在调整负荷的同时以稳定转速为主；调门的变化如果不能平衡用户负荷，将直接反映到网频上，而网频的稳定与否将直接影响铝厂的安全生产。

机组一次调频是指并网运行机组的调速系统根据电网周波变化自动控制机组功率的增减，当周波大于50Hz时，机组自动降低功率；而当周波小于50Hz时，机组自动增加功率。在控制策略中，调速系统根据转速偏差信号改变调门开度，以稳定机组转速，从而稳定电网频率。机组转速对应等于电网频率。

当只有单台50MW机组的实际运行时，铝厂运行了10个电解槽，阳极效应带来的负荷冲击约为机组实际负荷的10%；随着电解槽的增开，阳极效应带来的冲击负荷会更大些。

3、现场调试

3.1　软件一次调频

软件一次调频将给定转速和实际转速比较，根据得到的转速偏差信号，调节调门的开度，控制机组功率增减，维持频率恒定。霍煤铝电组态的一次调频折线函数为：

转速偏差	-200	-150	-2	2	150	200	200	200	200	200	200
一次调频值	-200	-100	0	0	100	100	100	100	100	100	100

使用软件一次调频的曲线图（见附图1）：

附图1为使用软件一次调频的曲线图，主汽压力约在8.3Mpa左右，正常时铝厂负荷为22MW，当发生阳极效应时，负荷增大到26.50MW，转速开始下降，此时一次调频作用，使阀门位置从36%增加到39%左右，约3个百分点，使转速维持在2992左右，阳极效应过后，转速又恢复到三千零几转。从1月17日18点到1月18日7点运行分析看，其间来过5次阳极效应（冲击负荷），通过软件一次调频，都能维持机组转速在2990～3010之间。

3.2 硬件一次调频试验

硬件一次调频即采用一次调频模块（FM165），接受测速模块FM163C的模拟转速偏差信号，经高选放大、修正之后，将动态补偿信号输出到FM146伺服模块，从而实现汽轮机DEH系统的调速部分的超驰控制功能，使汽轮机获得符合发电控制要求的静特性，保持电网频率稳定。

调节一次调频板FM165的数据记录：

系统转速	2950	3000	3050	3100	3150	3200	3250	3300	3350
FM163C输出（V）	0	0.59	1.22	1.84	2.48	3.07	3.74	4.31	4.72
FM165输出（V）	-0.48	0	0.51	1.04	1.57	2.07	2.62	3.11	3.45

硬件一次调频投入的运行曲线（见附图2）：

附图2为使用硬件一次调频的曲线图，正常时主汽压力在8.3Mpa左右，铝厂负荷为22.5MW，转速为3000转/分，当发生阳极效应时，负荷增大到26.50MW，转速开始下降，通过一次调频板的作用，使阀门位置从37%增加到40%左右，使转速维持在2994转/分左右，阳极效应过后，转速又恢复到3000转/分。当主汽压力降低到7.0Mpa后，调门开大到46%，也能使转速稳定在2990转/分左右。

3.3 软件一次调频与硬件一次调频的比较

随着转速下降，转速偏差增大，软件一次调频下限转速没有限制，可控制调门直到开到最大为止；而硬件一次调频在转速降低到2950转/分后，就不再起调节作用，随着转速降低，调门不再继续开大，需要手动二次调频才能使调门继续开大，维持转速稳定。这是由于一次调频板设计时转速偏差范围下限定得太高所致。在后续产品中已进行了改进，该缺陷已不复存在。附图3、附图4两图表达了两种调节方式的表现（见附图3、附图4）。

从附图3、附图4两图分析，随着转速的不断下降，硬件一次调频板的作用只能将阀位（红色曲线）从59%自动调到75%，之后必须通过手动阀位调节将调门开到最大。而软件一次调频随着转速的下降，不断调节阀位从58%增大，直到100%。

从调节效果来看，在转速偏差设计范围内，这两种方式对稳定转速作用都很好。

从附图3、附图4两图看来，在一次调频过程中，主蒸汽压力并无多大变化，能适应一次调频的要求。

一次调频板采用动态补偿原理设计，能在不改变原系统控制周期的前提下解决一次调频问题，特别适用于老系统的改造。

4、讨论

4.1 在单机运行之后，小网运行中各机组DEH相互之间如何协调问题

春节过后，铝厂计划投50个电解槽，负荷需求将达到80MW，因此需将#2（50MW）和#3（100MW）机组同时运行。

关于小网调频问题，用户曾提出过两种解决方案：

方案（1）：让一台机组参与调频，另一台定功率运行

由于孤网运行的机组，不宜投入负荷反馈，所以调频机组应采用较小的不等率，而调功机组应采用较大的不等率。这种方式使调整过程复杂化，故不可取。

方案（2）：让两台机组同时参与调频

当两台机组同时参与调频时，两机应采用相同的不等率，例如5%。两机承担的负荷将根据机组容量的大小，按比例分配。该方案实施简单，能兼顾可能出现的各种工况，故建议采用。

4.2 关于CCS投入问题

一次调频的能量支持，主要来自锅炉的蓄能，CCS的作用就是根据负荷变化的平均值帮助锅炉调压系统稳定主汽压力，不需要跟随一次调频过程调整燃料量及相关的系统，以免调整过于频繁。从运行实践看，一次调频过程中蒸汽压力并无多大变化，表明锅炉蓄能能够支持一次调频过程的能量需求。铝电负荷是一种十分稳定的负荷，阳极效应只是短时的小幅度变化，能量需求不多，锅炉的常规调压系统能够适应。只有在铝电或汽机甩负荷时，才须启动锅炉的保护措施。

5、小结

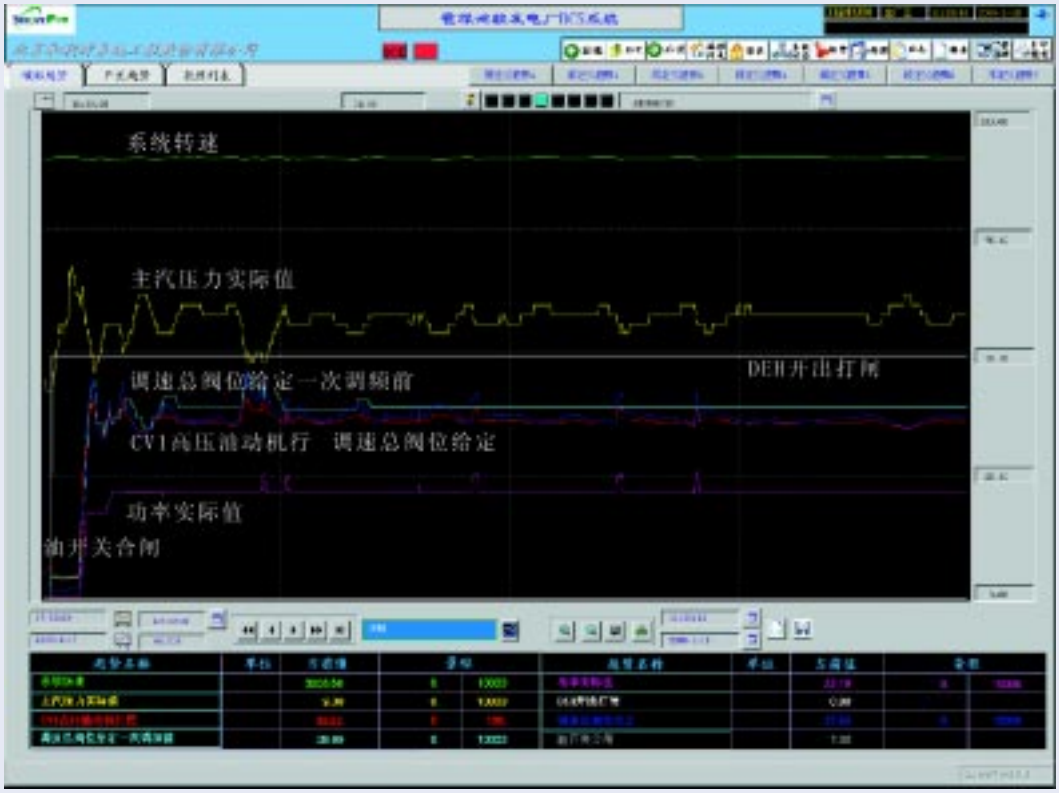
1）从目前单机带负荷运行情况看，我公司DEH提供的一次调频功能能满足孤网运行的要求，能较好地适应铝厂阳极效应带来的负荷波动；

2）对硬件一次调频投入试验，取得较好的效果，只是在负荷较轻时，由于下限转速定得较高，使调门不能开足，影响一次调频功能发挥。该缺陷现已进行了改进，调门开度不再受限，今后可以继续推广使用；

3）单机运行时，应采取一切可能措施确保机组正常供电。小网运行时，最好具备一定的后备功率，否则其供电可靠性与单机运行情况没有多大改善；

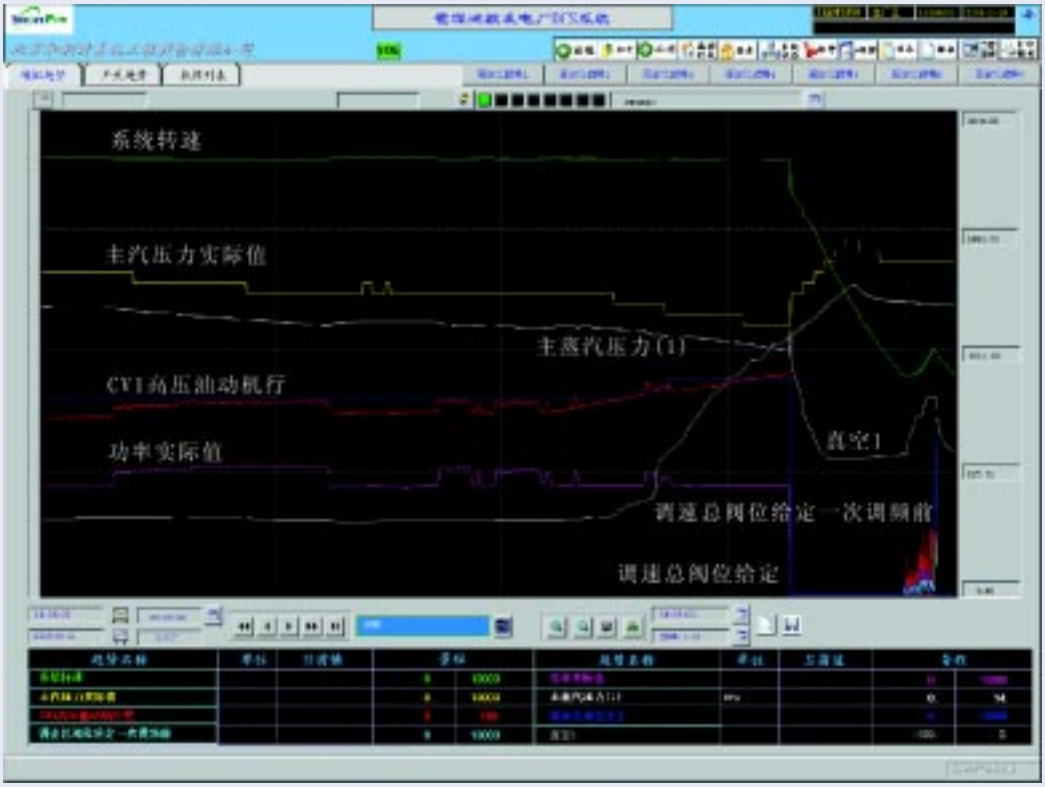
4）由于电厂机组的变负荷特性与铝厂生产过程的负荷变化特性不同，使电厂和铝厂都不能仅按自身的规律改变负荷，两者必须相互适应，相互协调，因此必须要有一个统一的指挥机构来协调铝电生产。



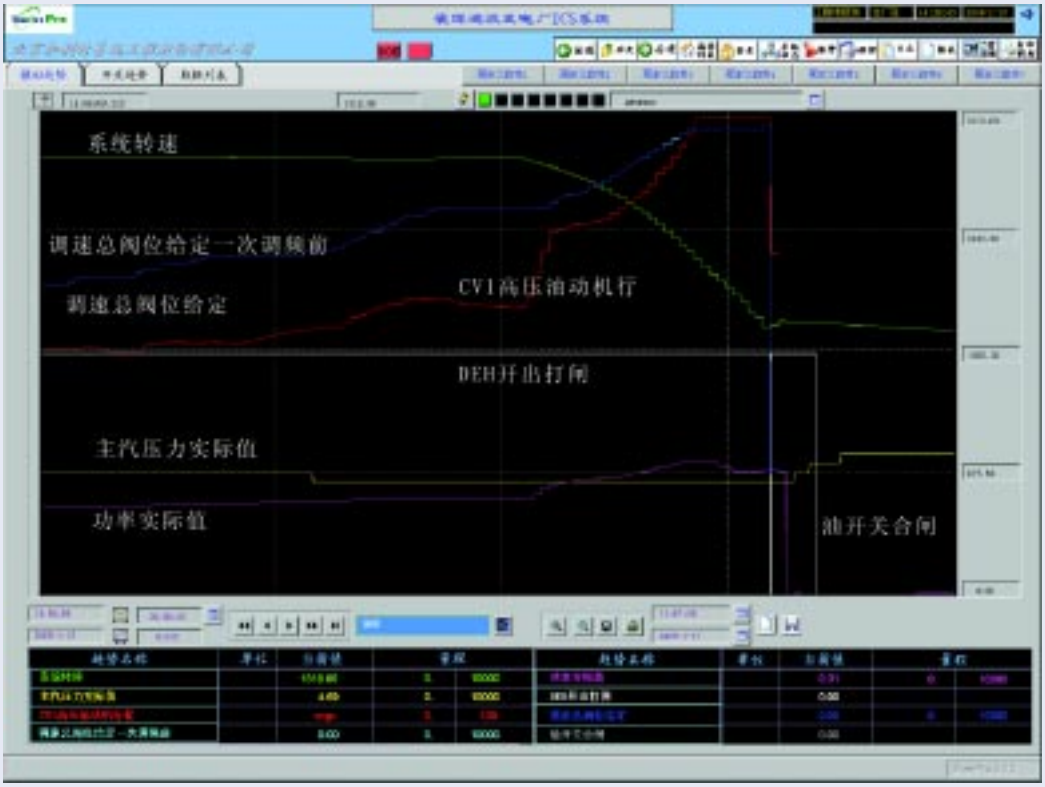


紫色—负荷曲线，红色—调门位置曲线，黄色—主汽压力曲线，绿色—转速曲线

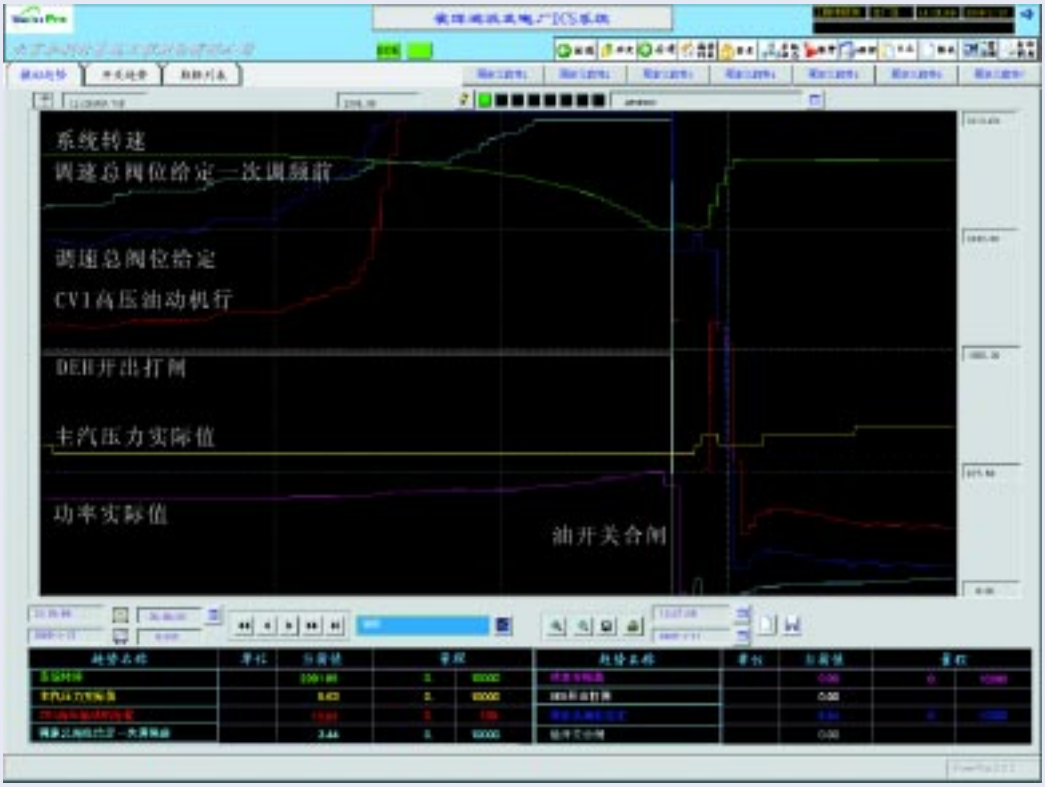
附图 1 软件一次调频曲线图



附图 2 硬件一次调频曲线图



附图 3 投一次调频板曲线图



附图 4 投软件一次调频曲线图

孤立电网甩负荷试验

杭州和利时自动化有限公司　　刘康宁　郑明

对汽轮发电机组进行甩负荷试验是检验汽轮机转速调节系统性能优劣最有效的方法。

常规的甩负荷试验是人为断开发电机出口油开关，使发电机甩50％或100％负荷，机组转速将以很高的加速度迅速升高。当DEH收到油开关跳闸信号或转速超过103％后，使OPC电磁阀动作，以限制最高飞升转速。DEH将调节系统切换为转速PID控制，待甩负荷2秒后OPC电磁阀失电，机组转速最终稳定在3000r/min。

但实际电网发生故障甩负荷时，发电机出口开关不一定跳闸。电网故障后机组运行环境可能改变为孤网甚至单机带厂用电情况。在这种情况下，由于没有油开关跳闸信号，OPC电磁阀不动作，机组将因超速而停机；或由于一次调频的稳态转速高于103％，超速103％功能会使OPC电磁阀反复动作，而被迫停机。

1、工程特点

山东滨州魏桥集团是一个大型民营企业。集团拥有独立的电网，现装机容量为700MW，主要分为邹平、魏桥两部分。由于集团电网是与国家电网完全独立的，其供电可靠性受到极大的关注。用户要求在电网发生故障时，机组不能因超速而停机；在各机组出力允许的范围内，能带部分负荷运行；最坏情况下，应能带厂用电维持机组运行，以便电网迅速恢复供电。

我们认为只要电网中所有的机组，经过下述甩负荷试验验证其转速调节系统性能合格，即可满足上述要求。

特殊的甩负荷试验：

1）人为断开发电机出口油开关，使发电机甩100％负荷，机组带厂用电。DEH在无油开关状态变化信号的情况下，采取措施使OPC电磁阀即时动作，避免机组超速。由DEH的一次调频作用稳定机组转速，最终通过人为改变给定值，将转速调整到3000r/min。

2）人为断开线路开关，使发电机甩50％负荷，电网还要带50％负荷。DEH在无油开关状态变化信号的情况下，采取措施使OPC电磁阀即时动作，避免机组超速。由于调节阀关闭后转速将迅速下降，要求油动机能迅速恢复。由DEH的一次调频作用稳定机组转速，最终通过人为改变给定值，将转速调整到3000r/min。

我们在传统DEH控制系统的基础上对魏桥3电厂2＃机组进行了如下改动：

3）取消了103％超速限制功能

由于若仅依靠103％功能，转速将多升约100r/min，超速限制效果不佳。而且为避免OPC电磁阀反复动作，故取消103％超速限制功能。

4）增加硬件加速度大OPC功能

当加速度大于预定值时，测速模块输出信号使OPC电磁阀动作。当加速度小于零时，测速模块输出信号复位。利用测速模块测量机组的加速度，响应时间可达20ms。在发生甩负荷时机组的加速度最大，可即时动作OPC电磁阀。

5）增加硬件转速微分调节功能

利用测速模块测量机组的加速度，通过D/A转换器输出代表加速度的电压信号，然后直接送到

伺服模件去修正阀位给定值。最终将一次调频由转速比例调节改为比例微分调节，可有效改善调节系统的动态品质。

6）缩短调节周期

将一次调频转速闭环回路的控制逻辑算法独立出来，设置运算周期为50ms，以增加一次调频系统的稳定性。

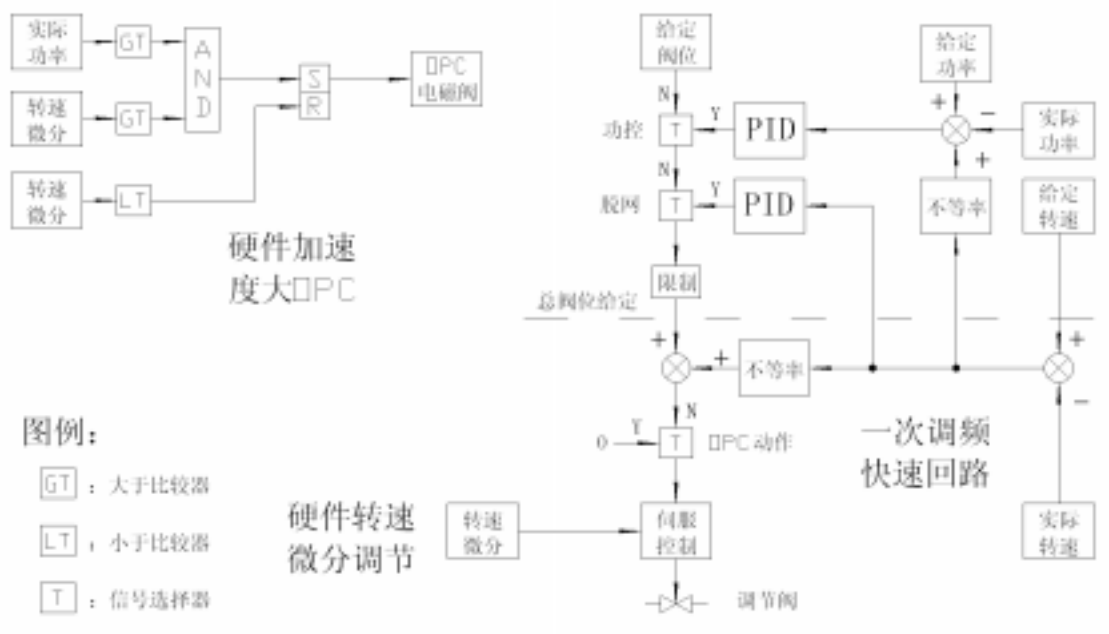


图1　DEH调节系统图

本DEH调节系统的特点是：DEH的控制对象为南京汽轮机厂生产的60MW凝汽式汽轮机，采用母管制运行模式。因此DEH取消了常规的锅炉协调控制、主汽压力控制功能。升速阶段，在传统转速PID调节的基础上也增加了一次调频转速比例微分调节。这样在机组在升速、并网带负荷的全过程中一次调频转速比例微分调节均参与控制，无需切换处理。在升速阶段即可验证一次调频的稳定性。利用测速模块能快速准确地测量出机组的转速及加速度，在电网发生故障时，硬件加速度OPC功能迅速动作OPC电磁阀，可有效防止超速及电网功角失稳（见图1）。

2、魏桥3电厂2#机组甩负荷试验

2005年5月5日对魏桥3电厂2#机组先后进行了2次甩负荷试验。由于担心无油开关跳闸信号会使转速超调过大，特地在第一次甩负荷试验前增加了发电机电流过低负荷不平衡OPC功能。担心发电机甩负荷后系统转速会变得过低，将系统转速调整得较高。

试验前将1#、2#机组工作点附近的实际局部不等率通过试验调整到了5%。

第一次甩100%负荷

15点40分甩100%负荷后，负荷由58.18MW甩到0，机组转速由3035r/min最高升到3236r/min，最后稳定在3140r/min。计算出本机组转速不等率δ_{32}为：

$$\delta_{32}=\frac{60}{58.18}\times\frac{140-35}{3000}=3.61\%$$

转速最高超调量Δ_n为：

$$\Delta_n = \frac{3236-3035}{3000} = 6.7\%$$

电网运行容量600MW，试验时总负荷499MW。

甩负荷后，相邻的1＃机组转速由3036r/min降到3013r/min，功率由30.7MW升到42.7MW，远处邻平2电厂2#机组转速由3035r/min降到3014r/min，功率由55.29MW升到59.31MW。

计算出魏桥3电厂1＃机组转速不等率δ_{31}为：

$$\delta_{31} = \frac{60}{42.7-30.7} \times \frac{36-13}{3000} = 3.83\%$$

计算出邻平2电厂2＃机组转速不等率δ_{22}为：

$$\delta_{22} = \frac{60}{59.31-55.29} \times \frac{35-14}{3000} = 10.4\%$$

计算电网等效不等率δ_W为：

$$\delta_W = \frac{600}{58.18} \times \frac{35-14}{3000} = 7.2\%$$

由于通常在额定工作点附近的局部不等率比平均不等率大，因此在额定工作点附近将不等率调整为5％后，总的不等率会偏小。从上述数据分析，应将魏桥3电厂2＃机组的一次调频修正系数由0.8减小为0.58。应将魏桥3电厂1＃机组的一次调频修正系数由0.75减小为0.57。

魏桥3电厂2＃机组甩为100％负荷转速飞升过程见图3。

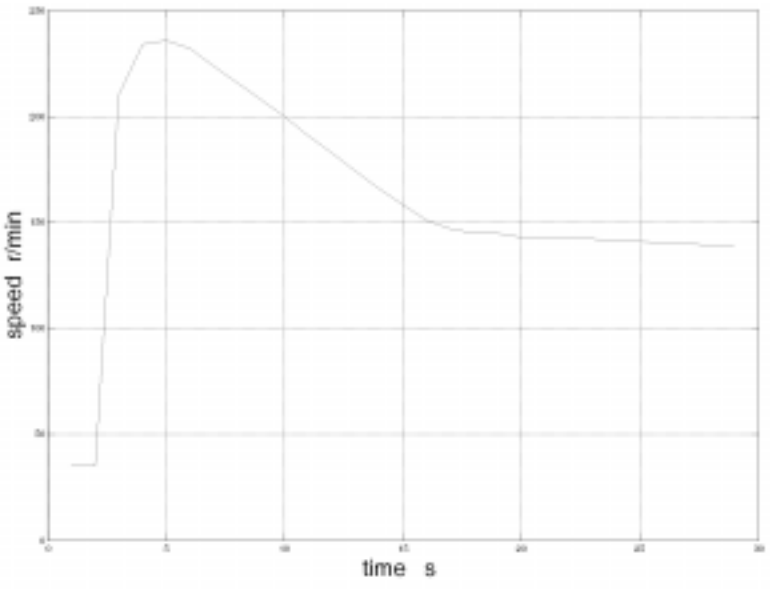


图3 转速飞升曲线

第二次甩100%负荷

取消了功率负荷不平衡功能。

16点17分甩100％负荷后，负荷由59MW甩到0，机组转速由3021r/min最高升到3232r/min，最后稳定在3000r/min。由于及时调整了阀位给定值，使机组转速回到了额定值。

计算转速最高超调量Δ_n为：

$$\Delta_n = \frac{3232-3021}{3000} = 7.0\%$$

电网运行容量600MW，试验时总负荷515MW。

甩负荷后，远处邹平2电厂2#机组转速由3021r/min降到3000r/min，功率由55.11MW升到58.58MW。

3 、邹平2 电厂2# 机组甩负荷试验

2005年5月12日对邹平2电厂2 #机组先后进行了2次甩负荷试验。

第一次甩50%负荷

10点40分甩50%负荷后，负荷由29.86MW甩到0，机组转速由3018r/min飞升到3112r/min停留一下后，机组超速打闸。经检查分析为：转速到3112r/min时加速度为0，OPC电磁阀失电，油动机交由伺服系统控制。此时控制系统输出给伺服模件的阀位给定值还约为甩负荷前的值！后发现组态中有一个点名错误。

此次甩负荷说明，甩50%负荷转速超调量仅为3.13%。

第二次甩100%负荷带厂用电

甩负荷前将机组在额定负荷附近的不等率调整到了5%。

13点40分甩100%负荷后，负荷由58.7MW甩到2.48MW，机组转速由3018r/min最高升到3215r/min，最后稳定在3120r/min。主汽压力由8.22MPa升到8.98MPa。

计算出邹平2电厂2 #机组转速不等率δ_{22}为：

$$\delta_{22} = \frac{60}{58.7-2.48} \times \frac{120-18}{3000} = 3.63\%$$

计算转速最高超调量Δ_n为：

$$\Delta_n = \frac{3215-3018}{3000} = 6.57\%$$

电网运行容量600MW，试验时总负荷514MW。

计算电网等效不等率δ_W为：

$$\delta_W = \frac{600}{58.7-2.48} \times \frac{3019-2994}{3000} = 8.89\%$$

从上述数据分析，应将邹平2电厂2 #机组的一次调频修正系数应减到原来的0.73倍。

由于此次条件不具备，未进行本文建议的机组甩50%负荷后仍带50%负荷的试验。

结论

通过本次试验证明，和利时公司为山东滨州魏桥集团生产的DEH控制系统完全能满足孤网运行、甩负荷带厂用电的要求。

若电网中所有机组都能完成本文建议的甩负荷试验，则电网供电的可靠性将有望得到进一步提高。

大连西咀DEH孤网运行

杭州和利时自动化有限公司　　纪云峰

1、项目概况

大连西咀热力有限公司是大连北良有限公司的自备热电厂，为了促进北良粮食深加工等项目的发展，完善配套设施功能，于2004年2月3日正式破土动工建设。一期工程设计规模为2×15MW汽轮发电机组。并配有二台CG-130/5.30型煤粉次高压锅炉。该热电厂是以“热电联产，以热定电、集中供热”的原则，根据热负荷的具体情况确定主机选型。#1机为15MW单抽机组，#2为15MW背压机组，均为哈汽实业公司生产的新机组。

#1、#2机组的DCS系统采用AB公司的硬件，由国电南京自动化公司实现，#1机组DEH系统由和利时通过中国华电工程（集团）有限公司总包获得，#2机组仍采用原液压系统调节。目前投运的只有#1单抽机组和一台锅炉。

#1单抽机组由7月份冲到3000转做完超速试验后，由于申请上网十分困难，于是西咀热力有限公司决定孤网运行。

2、控制方式

在孤网运行中，由于机组脱离电力网，成为独立电网，此时DEH控制的负荷不象其它机组，调节汽阀开启则增加负荷，这里负荷只取决于公司用户，DEH的任务由负荷控制变化为以稳定转速（频率）为主。

电网频率的主要调节手段有一次调频和二次调频：

一次调频功能主要是根据电网频率的变化，按照一次调频预定的曲线，对机组功率进行调整，其核心是在电网负荷发生变化的时候，利用锅炉蓄能，根据转速变化调整汽机功率，以达到在有限频率变化的前提下实现功率与负荷平衡。

二次调频是通过手动或自动方式，改变阀位给定值，消除一次调频后的频率静态偏差，使电网频率回到额定值。一、二次调频原理如图2所示。

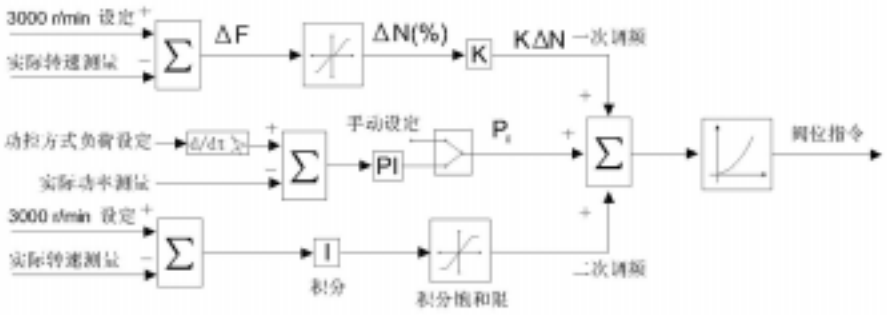


图2　一、二次调频原理

3、孤网运行实现

按照事先的安排，先投入试验负荷，逐渐增加看机组能稳定调节后，再接待生产负荷。图3为录入的11月5日14点20分至6日8点20分的运行曲线图。从图中可以看出，通过一次调频的快

速调节和二次调频的积分作用，是机组转速基本稳定在3000转/分左右，在起停大负荷设备时，转速瞬时最高有27转/分的波动，经4、5秒钟即恢复到3000转/分左右。



图3 孤网运行曲线

最后利用最后停机时刻，油开关解列，将剩下的1.45MW的负荷甩掉，当时OPC未动作（实际负荷小于额定的10%），靠一次调频作用将调门关回，此时转速最高达到3033转/分，之后马上恢复到3000转/分。

4、小结

1）根据孤网运行的特点，设计了合适的控制系统和控制策略，成功实现了机组的孤网稳定运行，解决了用户上不了网的老大难问题；

2）机组一次调频功能即调速器功能，利用锅炉蓄能，快速实现机组功率与用户负荷平衡，避免了频率的大幅波动；

3）通过手动或自动二次调频方式，消除一次调频后的频率静态偏差，使电网频率回到额定值，进一步完善了机组的调频功能。



华东某发电厂小网事故分析

杭州和利时自动化有限公司　　罗作桢

1、事故经过

华东某发电厂电气一次接线如图1

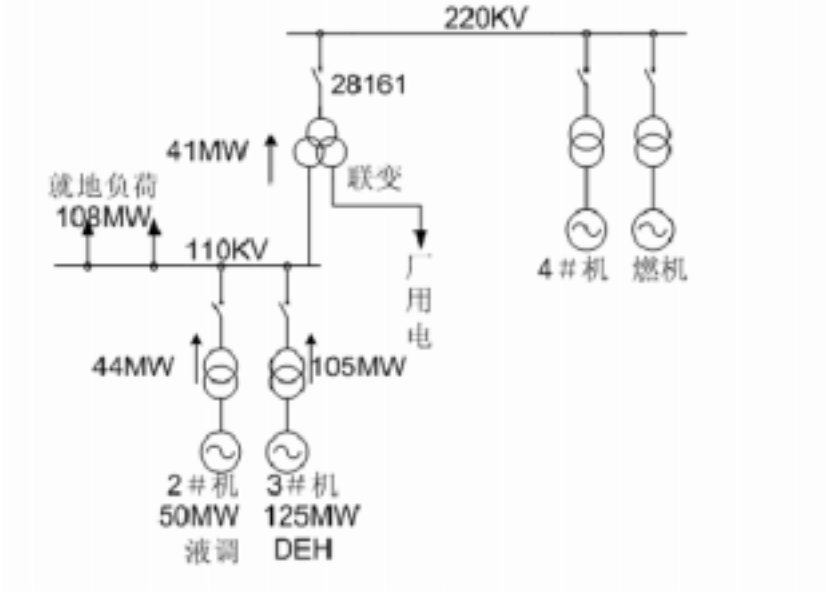


图1 华东某发电厂电气一次线

事故前，该厂2#机和3#机并列运行在110KV就地网（小网）上，带就地负荷；同时，通过联络变压器向220KV电网（大电网）送电。

2#机容量为50MW，配有液压调节系统。

3#机容量为125MW，配DEH控制系统，一次调频功能没有投入。

当时的潮流为：2#机组向110KV网送电44MW，3#机组向110KV网送电105MW，两机共送电149MW。

110KV网带就地负荷108MW，同时通过联络变压器向220KV网送电41MW。

2#、3#机总容量为175MW，事故前的实际负荷为149MW。

事故时，联络开关28161跳开，甩去41MW负荷，2#、3#机带110KV就地负荷108MW，孤网运行。由于功率过剩，和3#机103%no功能的共同作用，造成孤立小网频率大幅度波动，频率波动范围为52.1Hz～48.3Hz，相当于转速波动3126rpm～2898rpm，Δn＝228rpm，波动周期约为4秒。

103%no动作六次后，因安全油压低跳闸。

2、频率波动过程分析

孤网形成后，2#、3#机所带110KV小网剩余功率为41MW，使转速从3000rpm上升。这时，只有2#机的液压调节系统在调频。

当转速升高123rpm时，不平衡功率应为0，2#机功率应减小至3MW。3#机仍为105MW。若不是103%no的动作，小网应维持在3123rpm稳定运行。

但是，实际上，由于103%no的动作转速为3090rpm，当转速超过3090rpm时，3#机调门

关闭，功率下降为0。所以记录到的最高转速为动态过程的超调值，超调值约为36rpm。

103%no动作后，3#机功率下降到0，小网的残余不平衡负荷为105MW，它使转速快速降低，负荷转移到2#机。

随着转速下降，2#机功率增大；当转速降低到2982rpm时，2#机已带到额定功率。考虑到2#机有15%的过载能力（油动机开足），能支持转速降到2959.5rpm。所以最低转速2898rpm为超调所致，超调值61.5rpm。

当转速下降到某一数值时，3#机103%no动作复位，重新发出105MW功率。于是带来转速新一轮波动。

转速每波动一次，各油动机关、开一次，蓄能器存油减少一次。当波动到第六次时，蓄能器存油耗尽，导致供油压力急剧下降，安全油压下降而跳闸。

这时，2#机仍在网中，2#机容量仅为50MW，终因不堪重负而停机。

由此看出，事故过程中仅是由于有2#机的液压调速系统在起一次调频作用，才未导致超速保护动作。

如果3#机也能正常参与一次调频，则小网后的转速升高将为35.1rpm，小网将维持3035rpm稳定运行，103%no也就不会动作，小网崩溃事故可以避免。通过二次调频，很容易使小网频率回到50Hz。

3、小结：

造成小网崩溃的原因应归结为：

1）3#机没有投入一次调频。

2）采用103%no的OPC方式必然导致事故扩大。

4、改进措施建议：

1）3#机DEH，应根据调速系统特性要求，正确投入一次调频。

2）改进超速限制方法，103%no超速限制应退出，最好采用转速微分方式。

3）调速系统特性要求如下：

★调速不等率统一设为5%。

★调速系统迟缓率应小于0.1%，不应另设调频死区，另设调频死区等于加大迟缓率。

★DEH的调速系统控制周期应设为50ms，保证响应速度符合稳定性要求。









北京和利时系统工程股份有限公司
地址：北京市海淀区建材城中路10号
邮编：100096
电话：（010）82922200
传真：（010）82923980
网址：www.hollysys.com

杭州和利时自动化有限公司
地址：浙江省杭州市下沙经济技术开发区19号路北1号
邮编：310018
电话：（0571）81633800
传真：（010）81633700
网址：www.hollysys.com