

第 3 章

电力系统频率偏差

3.1 电力系统频率的概念

3.1.1 频率偏差

电力系统正常运行工况下,应在额定频率下运行。系统中的所有电气设备只有在额定频率下才能获得最好的可靠性和经济性,这是在设计时被确定的。电力系统负荷的大小每时每刻在不断变动,电源出力及其频率调节系统跟随负荷变化又有一定的惯性,致使系统频率总是处于变动的状态之中。因此,必须对运行频率规定允许的偏差范围,以确保运行的可靠性和经济性。

国家标准《标准频率》(GB/T 1980—2005)规定,设备的额定频率允许偏差范围为 $\pm 1\%$ 。国家标准《隐极同步发电机技术要求》(GB/T 7064—2008)规定,发电机的频率偏差范围为 $\pm 2\%$ 。两个标准允许的偏差范围有较大差别,这是因为用户对系统提供的电能质量要求高一些,以利于安全经济地使用电气设备。汽轮发电机作为电能的供应方,要求自身承受频率偏差的能力大一些,以增加保证系统安全、经济运行的应变能力。两者从不同的角度为了同一个目的对频率偏差提出不同的要求,这是十分合理的。同样,在供电方能达到的条件下尽量满足用户需求,从电力系统的整体可靠性、经济性出发,将电力系统频率允许偏差规定得小一点也是应该的。

3.1.2 频率的基本属性

电频率是与发电机组转速直接相对应的交流电的频率,其表达式为

$$f = \frac{pn}{60} \quad (3-1)$$

式中, p 为发电极对数; n 为机组每分钟的转数。

机组转速取决于机组输入、输出能量的平衡程度,并受机械惯性的制约,具有惯性,其标幺值表示式为

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_e - D(\omega - 1) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, T_J 为机组惯性常数, s; δ 为转子 q 轴与以同步速旋转的坐标实轴之间的夹角, rad; M_m 为机械转矩; M_e 为电磁转矩; D 为机械阻尼系数; ω 为角频率, $\omega = 2\pi f$, rad/s。

因此, 电频率是一个惯性量。这使得电频率数值借助测量电压波速度而间接获得时, 受电压相量无惯性及波形畸变(噪声、谐波及运行工况突变等造成的)的影响, 往往难以检测到。

为了进一步理解频率的基本属性, 以系统中某一节点 a 突然增负荷($+\Delta P$)为例, 来考虑频率的相应变化。 $+\Delta P$ 的出现, 打破了系统原有的功率平衡状态。系统中各电源(机组)将按各自的电动势 E 对节点 a 的电气距离成反比来分摊负荷增量, 亦即按各自同步功率 $\frac{\partial P}{\partial X}$ 成正比来分摊负荷增量 ΔP , 并释放转子惯性系统储存的部分动能, 力图使系统能量维持均衡。转子动能的消耗将使机组转速下降, 频率也会相应降低。这将促使电源(机组)按各自调速系统的调差系数来重新分配负荷。系统事先安排的调频机组增加出力使得系统功率重新平衡。在整个过程中, 因各机组初始承担的负荷不同和调差系数不同, 机组新增负荷功率的分配比例不停地改变着, 各电源(机组)频率围绕着系统等值惯性中心频率变化的轴线振荡, 并随之下降和回升, 逐渐和等值惯性中心的频率趋于一致, 最终回到系统正常的运行频率偏离范围之内。

3.1.3 电力系统频率、电源频率和负荷节点频率

电力系统在正常运行状态下, 用电负荷和发电机出力一直不断地变动着, 所属设备的操作也时有发生, 这就使系统中不同节点的频率产生不同程度的波动, 这种波动是系统能量均衡的动态过程。在不破坏整个系统稳定运行的前提下, 用测量设备在不同节点同时检测, 不易觉察到波动的差异, 即在概率统计的意义下各节点的频率是相等的, 并在作同步的变化。因此, 由任一节点测得的频率均为系统频率。

在系统动态过程中, 电源的频率取决于自身原动机能量输入、其他机组同步力矩对它的牵制及负荷的分布, 因此, 和其他节点的频率存在着差异, 在系统失步的过程中这种差异尤为明显, 而且带来的危害也很大。

负荷节点的频率取决于系统内各电源等值电动势相量相对运动传递到该节点的电压相量在时间轴上的运动轨迹。负荷中旋转机组的机械惯性仅是电源机组的几百分之几。在这种惯性支撑下, 负荷群失去电源之后的几十毫秒内, 伴随着频率的衰减会出现一个残压衰减的过程。过去为防止按频率减负荷装置误动而延迟其动作时间, 就是为了避开这种频率衰减引起的电源未中断假象。

动态过程中, 若系统处于稳定运行的临界状态、已失步状态或失步后转入再同步的过程中, 则系统各节点的频率值不等, 但在仍能维持同步的系统局部区域内, 电源动态等值机组的转速主导着该局部区域的“局部系统频率”。“局部系统频率”可用来作为分析系统工况的一个参量, 但它已超出了传统的频率定义范围。

3.1.4 频率波动

电力系统中的负荷一直处在变动之中,但专业人员可以凭经验,结合各种负荷变动的统计规律、用户负荷增减的申请和天气预报等资料,预报次日 24h 的负荷曲线,其误差一般不大于 3%。这说明系统中负荷的波动是有规律可循的。运行经验表明,负荷的瞬时变化由三部分组成:一是变化周期一般小于 10s 的随机分量;二是变化周期在 10s~3min 的脉动分量,其变化幅度比随机分量的幅值要大些;三是变化十分缓慢的持续分量并带有周期规律的负荷,这是由工厂的作息制度、人们的生活习惯和气象条件的变化等造成的,也是负荷变化的主体,一般负荷预测主要就是预报这一部分。图 3-1 为电力系统负荷变化的分解示意图。

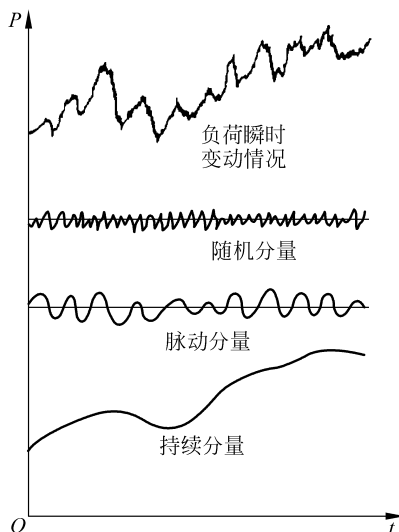


图 3-1 电力系统负荷变化的分解示意图

负荷的波动势必导致电力系统频率的波动。但由于电力系统自身的惯性,频率波动(frequency fluctuation)是被动的,对其起主要影响的是上述负荷波动中后两个变化分量。

3.1.5 电力系统的频率特性

从能量的角度考虑,输变电网络和电源的能量损耗(包括厂用电负荷)均可视为负荷的一部分。这样,电力系统可视为发电机组和负荷两个环节的能量控制闭环系统,其功率与频率的关系即频率特性。可先分别研究这两个环节的,然后再综合成系统总体的。

1. 电力系统负荷的功率-频率静态特性

不计及系统电压波动影响时,系统频率和系统负荷功率的关系为

$$P_L = F(f) \quad (3-3)$$

负荷有功部分与频率的关系,可归纳为 5 类。

- (1) 与频率变化无关的负荷,如照明、电弧炉、电阻炉、整流负荷等;
- (2) 与频率的一次方成正比的负荷,如切削机床、球磨机、往复式水泵、压缩机、卷扬机等;
- (3) 与频率的二次方成正比的负荷,如电网线损、变压器中的涡流损耗等;
- (4) 与频率的三次方成正比的负荷,如通风机、静水头阻力不大的循环水泵等;
- (5) 与频率的更高次方成正比的负荷,如静水头阻力很大的给水泵等。

因此,负荷的功率-频率静态特性一般表示为

$$P_L = a_0 P_{LN} + a_1 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + \cdots + a_n P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^n \quad (3-4)$$

式中, f_N 为额定频率; P_{LN} 为系统频率为额定值时, 整个系统的有功负荷; P_L 是系统频率为 f 时, 整个系统的有功负荷; $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 分别为与系统频率的 $0, 1, 2, 3, \dots, n$ 次方成正比的负荷占额定负荷的百分比。

以额定频率和额定频率下的负荷功率 P_{LN} 为基准值, 则式(3-4)的标幺值表达式为

$$P_{L*} = a_0 + a_1 f_* + a_2 f_*^2 + a_3 f_*^3 + \dots + a_n f_*^n \quad (3-5)$$

由定义可知, $a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n = 1$ 。

式(3-5)称为电力系统负荷功率-频率静态特性方程, 可用图 3-2(a)的曲线表示。

通常与频率变化三次方以上成正比的负荷很少, 如忽略其影响, 并将式(3-5)对频率微分, 得

$$\frac{dP_{L*}}{df_*} = a_1 + 2a_2 f_* + 3a_3 f_*^2 = K_{L*} \quad (3-6)$$

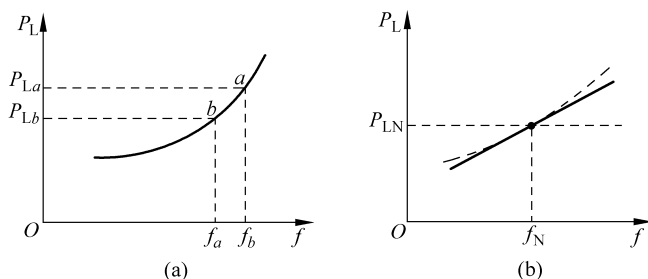


图 3-2 电力系统负荷功率-频率静态特性曲线

从图 3-2 可见, 当系统频率偏离额定值时, 系统负荷功率的变化方向与频率变化的方向一致, 即: 当频率上升时, 负荷需求功率随之增加, 阻止频率的上升; 频率下降时, 负荷需求功率跟着下降, 抑止频率的下降。负荷的频率效应起到减轻系统能量不平衡的作用。因此, 称 K_{L*} 为负荷的频率调节效应系数, 其倒数 S 称为负荷的调差系数。电力系统允许频率变化的范围很小, 为此负荷功率与频率的关系曲线可近似地视为具有不变斜率的直线, 如图 3-2(b)所示。这斜率即为 K_{L*} 。它表明系统频率变化 1% 时, 负荷功率变化的百分数。对于不同的电力系统, 因其负荷需求功率对频率变化的效应不同, K_{L*} 值也不相同, 一般 $K_{L*} = 1 \sim 3$ 。即使是同一系统, K_{L*} 也随季度及昼夜交替导致负荷组成的改变而变化。在实际系统中, K_{L*} 可以通过测试求得, 但测试时系统频率需作较大幅度的变化, 发电机组的原动机调节阀又需卡住, 因此, 测试带有相当大的风险, 而且所得仅是电力系统一种工况下的 K_{L*} , 大型电力系统不宜采用这种方法。根据负荷统计资料也可分析估算出 K_{L*} 值, 但工作量较大, 即使借助计算机分析计算, 收集原始数据的任务仍十分繁重。电力系统调度部门在运行调度(尤其是事故处理)和按频率自动减负荷的整定中, 都离不开 K_{L*} 值, 一般地, 调度人员凭借运行经验(尤其是事故处理经验), 再辅以分析估算, 即可得到所在系统近似的 K_{L*} 值。

当系统频率变动不大时, 电压的影响很小, 忽略其影响并不妨碍获得有足够精度的频率特性, 这样可以使对负荷功率-频率静态特性的分析简洁、清晰, 又保证其精度满足工程应用的需求。实际运行时, 系统中某一节点负荷的功率-频率的静态特性不仅与电压有关, 而且频率和电压之间往往存在着负的调节效应。

2. 发电机组的功率-频率静态特性

当电力系统频率变化时,促使发电机组的原动机(即汽轮机或水轮机等)调速系统自动改变原动机工质的输入,从而改变发电机的出力,以求系统功率供需平衡,恢复频率到正常允许偏差范围之内。这表明发电机组的功率-频率特性取决于调速系统的特性。人们把频率变化导致发电机组输出功率变化的关系称为发电机组的功率-频率静态特性,其曲线如图 3-3 所示。

发电机组以额定频率 f_N 运行时(图中 a 点),其对应的出力为 P_{Ga} ;当系统负荷增加使频率下降到 f_1 时,在调速系统作用下,发电机组输出功率增至 P_{Gb} (图中 b 点),即频率下降 Δf ,发电机组输出功率增加 ΔP 。这是有差调节,其特性称为有差调节特性。特性曲线的斜率为

$$\sigma_* = -\Delta f_* / \Delta P_{G*} \quad (3-7)$$

式中, σ_* 称为发电机组的调差系数,以标么值表示;负号表示发电机输出功率的变化和频率变化方向相反。整理式(3-7)得

$$\Delta f_* + \sigma_* \Delta P_{G*} = 0 \quad (3-8)$$

一般称式(3-8)为发电机组的静态调节方程。在计算发电机功率与频率的关系时,常常采用调差系数的倒数,即

$$K_{G*} = 1/\sigma_* = -\Delta P_{G*} / \Delta f_* \quad (3-9)$$

式中, K_{G*} 为发电机的功率-频率静态特性系数,亦称为原动机的单位调节功率,它标志了随频率的升或降发电机组发出功率减少或增加的值。

发电机组的 σ_* 和 K_{G*} ,通常取如下值:

汽轮发电机组为 $\sigma_* = 3\% \sim 6\%$, $K_{G*} = 16.7\% \sim 33.3\%$;

水轮发电机组为 $\sigma_* = 2\% \sim 4\%$, $K_{G*} = 25\% \sim 50\%$ 。

电力系统中调差系数的选择,需全面考虑火电机组、水电机组及系统送受端机组之间定值的协调与配合,这对维持电力系统内频率的稳定运行影响很大。一般地,为了减少电力系统的频率波动,汽轮机调差系数取得小一点,但这必须在水火电调差系数协调的基础上考虑,否则,会助长频率波动。

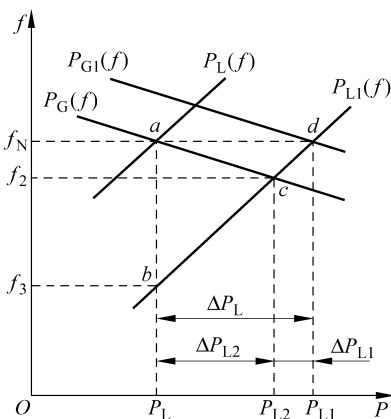


图 3-4 电力系统频率静态曲线

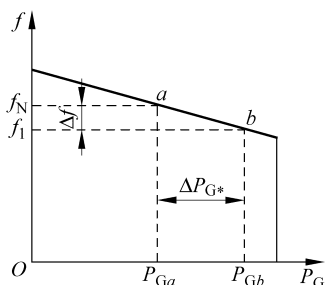


图 3-3 发电机组的功率-频率静态特性曲线

3. 电力系统的频率静态特性

将负荷和电源两个环节的功率-频率静态特性曲线绘在一起可以得到电力系统的频率静态特性,如图 3-4 所示。从图 3-4 可知,发电机组的功率-频率静态特性与负荷的功率-频率静态曲线的交点是电力系统频率的稳定运行点(图中 a 点),对应的系统负荷功率为 P_L ,运行频率为额定频率 f_N 。当系统负荷增加 ΔP_L 时,若此时系统内所有发电机组的调速系统均

不动作,机组的输入功率保持为 P_T 不变且等于 P_L ,则会使系统达到新的平衡点(图中 b 点)。此时频率下降到 f_3 ,系统负荷吸收的功率仍为原来的 P_L 。但在频率从 f_N 下降的过程中,机组调速系统实际上将会动作,增加机组的输入功率,经过一段时间后,运行点稳定在 c 点,这时系统负荷已从 P_L 增到 P_{L2} ($P_{L2} = P_{L1} + \Delta P_{L2}$),仍小于额定频率下所需的功率 P_{L1} ($P_{L1} = P_L + \Delta P_{L1}$),频率稳定在 f_2 。调速系统这个时段的作用,是将频率 f 从 f_N 欲降到 f_3 ,恢复到仍低于 f_N 的 f_2 。这种调节作用,通常称为频率的一次调节。

运行点 c 并没有满足负荷增加 ΔP_L 的需要,而且频率还因为新增功率 ΔP_{L2} 而下降到 f_2 。这表明负荷功率虽然增加了一部分,但生产效率却因频率下降而下降了。因此,需要自动调频装置自动操作调速系统的整定机构,使发电机的功率-频率静态曲线向上平移,直至系统发电机组的输入功率能符合负荷功率增长 ΔP_L 的需求。此时运行点移到 d 点,频率恢复到额定值 f_N 。这种移动调速系统特性曲线使频率恢复到额定值的操作,称为二次调节,即调频装置的调节是二次调节。

4. 电力系统的频率动态特性

负荷的突然增减,使系统中能量供求关系失去平衡,系统频率将从正常的稳态值过渡到另一个使能量供求达到新平衡的稳态值。频率的这种变化过程,称为电力系统的频率动态特性。电力系统的频率动态特性,与系统中电源备用容量大小、负荷调节效应、电源(机组)的机械惯性和负荷的机械惯性等有关。电力系统频率动态特性曲线示意图如图 3-5 所示。

当系统中无旋转备用容量时,系统频率将逐步下降到新的稳定频率,如图 3-5 中曲线 1 所示。当有旋转备用容量时,系统频率通过波动而降至新的稳定频率,如图中曲线 2、3 所示,波动的幅值与负荷的调节效应系数 K_{L*} 有关。当 $K_{L*} = 1$ 时,对应曲线 2;当 $K_{L*} = 2$ 时,对应曲线 3。在频率变化的动态过程中,电源(机组)之间是在振荡中逐渐一致地抵达新的频率稳态值。因此,在频率变化的动态过程中各电源(机组)的频率与系统频率存在着差异,机组频率之间的差异会更大些。

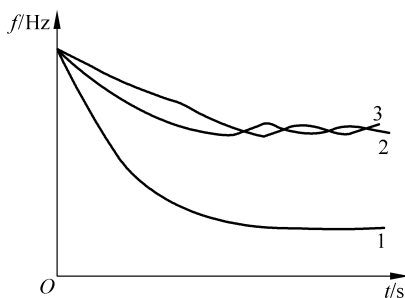


图 3-5 电力系统频率动态特性曲线示意图

3.1.6 频率突然下降及崩溃

发电厂内部故障或其出线故障、系统解列成几个小系统、电源与负荷平衡遭到严重破坏时,均可能导致电力系统频率大幅度下降。为此,系统调度部门都需预先按实际运行条件,制定相应的防止频率大幅度下降的措施。在频率降低的过程中,这些措施能有效地遏制这种恶性事故的发生或扩大。但运行中仍可能由于功率缺额太大或所采取的预防措施不力,而导致频率大幅度下降。一般从频率开始下降,遏制措施起作用,至电源与负荷重新维持平衡,频率稳定于新运行点的全过程约为几秒至几十秒,其变化过程如图 3-6 所示。图中的 AUFLS(automatic under-frequency load shedding)是按频率自动减负

荷装置。

事故中频率若不能迅速恢复正常,系统被迫在低频率下运行,将十分危险。因为电源与负荷在低频率下的重新平衡是很不牢固的,其稳定性很差,抗干扰能力太弱,稍有负荷或电源的波动,很可能再次失去平衡,频率再度下降,功率不平衡的程度更加严重,甚至发生频率崩溃和系统分解。

频率崩溃是场大灾难,不仅系统瓦解,甚至还会导致全系统或区域性系统的停电,事故恢复时间可能长达数小时甚至更长,其过程如图 3-7 所示。

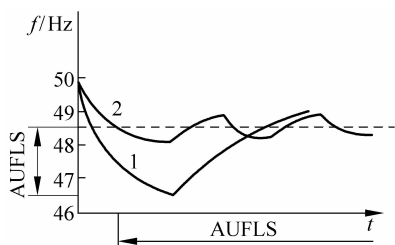


图 3-6 电力系统故障引起的频率下降过程

1—大量功率缺额；2—重复缓慢的频率降低

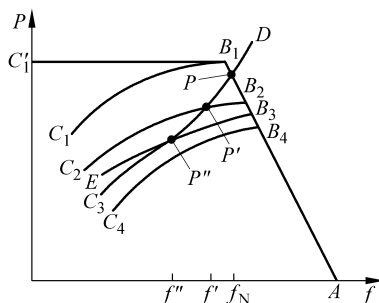


图 3-7 电力系统频率崩溃过程

频率大幅度下降时,火电厂的厂用机械,尤其是高压给水泵、汽轮机离心式主油泵出力将下降,往往迫使发电机出力下降,导致功率缺额加大,频率进一步下降,并形成恶性循环。图 3-7 中,曲线 AB_1C_1 、 AB_2C_2 、 AB_3C_3 、 AB_4C_4 为系统等值电源与频率的关系曲线, DE 为系统等值负荷的频率特性曲线。当系统发生某一功率缺额时,假设运行点从额定频率 f_N 时的曲线 DE 和曲线 AB_1C_1 的交点 P 下降至 P' 点。频率下降引起厂用机械出力下降,影响发电机运行特性后的发电机频率特性曲线 AB_2C_2 ,与负荷频率特性曲线 DE 的新交点就是 P' 点。 P' 点运行频率 f' 比较稳定。不论频率向上、向下变化,所产生的系统功率余额总是促使频率往恢复 f' 的方向移动。若系统频率下降得更多,使发电机的频率特性下降到 AB_3C_3 ,正好与负荷频率特性曲线 DE 相切于 P'' 。此时,由于系统的剩余功率为负值,频率稍往下降,就会导致频率进一步下降,使厂用机械出力下降。设发电机频率特性曲线下降为 AB_4C_4 ,与等值负荷频率特性曲线已没有相交(或相切)的可能,频率将一直下降,直至崩溃。因此,称 P'' 为稳定运行临界点。

频率下降除影响厂用机械出力之外,有时还会引起厂用机械或主机的故障和跳闸。一般情况下,当频率降到 45 Hz 以下时,汽轮机的离心式主油泵油压显著下降,迫使汽轮机主汽门自动关闭,汽轮机停运。高压给水泵出力随频率下降以三次方或更高次方的速度下降,也会迫使锅炉停运。这些更加速了上述恶性循环。

当频率下降,即发电机转速下降时,发电机的电动势将减小,无功功率出力降低,系统内部并联电容器补偿的出力也随之下降,而用户需要励磁用的无功功率却增加,促使系统电压随频率的下降而降低,威胁系统的安全稳定。当频率低至 43~45 Hz 时,极易引起电压崩溃。

综上所述,一旦发生频率大幅度的下降,恢复正常的过程可能很长。为此,调度运行部

门在编制运行计划时,就必须采取各种预防措施,防止频率事故的发生;同时还应有相应的补救措施,遏制事故的扩大,迅速将频率恢复至正常运行水平。

3.1.7 频率与电压的关系

电力系统的频率和电压这两个电气参数间存在着紧密的依存和制约关系,只有在正常运行允许的偏差范围内,才有可能假定彼此的影响可以忽略不计。但当上述参数中某一个作快速大幅度变化,或系统中上述两参数之一处在正常允许偏差之外运行时,另一参数的变化就必须计及相互间的影响,否则将难以得到符合实际的结论,也无法找出正确的改善对策。

系统负荷的功率静态特性可表示为

$$P = F_1(f, u), Q = F_2(f, u)$$

负荷的频率静态可用微分形式表述:

$$\text{有功部分} \quad \frac{dP}{df} = \frac{\partial P}{\partial f} + \frac{\partial P}{\partial u} \frac{du}{df} \quad (3-10)$$

$$\text{无功部分} \quad \frac{dQ}{df} = \frac{\partial Q}{\partial f} + \frac{\partial Q}{\partial u} \frac{du}{df} \quad (3-11)$$

这种特性是负调节效应,对频率、电压的变化相互起着阻尼作用。除极个别的情况外,绝大部分时间内是有利于运行稳定性的。

同样,发电机的频率特性也受电压的影响。发电机电势按励磁系统不同,随着频率的平方或三次方成正比变化。当系统频率下降时,发电机的无功出力将减小,用户需要的励磁功率将增加。此时若系统无功电源不足,频率下降将促使电压随之降低。经验表明,频率下降1%时,电压相应下降0.8%~2%。电压下降,又反过来使负荷的有功功率减小,阻止频率的下降。在无功电源充足的情况下,发电机的自动励磁调节系统将提高发电机的无功出力,防止电压的下降,即发电机的无功出力将因系统频率的下降而增大。当系统频率上升时,发电机的无功出力将增加,负荷的无功功率将减少,使系统电压上升。但发电机的自动励磁调节系统将阻止其上升,即发电机的无功出力在频率上升时下降。

系统运行工况急剧变化时,频率与电压的相互影响更大。例如,在20世纪70年代,我国某电力系统通过双回110kV线路向一很弱的受端系统送电。当两线路因故障同时跳闸后,该地区有功缺额虽很大(即输入功率远大于地区电源出力),但频率并未下降,按频率自动减负荷装置不动作,电压却陡降,甩掉大部分负荷,导致地区电厂机组超速全停。

频率与电压这种相互关系,不仅其负的调节效应可以利用,而且在考虑调整和改善运行工况时也十分有用。例如发电机励磁系统控制策略上的改进,就是充分利用了频率与电压之间相互依存制约的关系。自从发电机自并激方式被广泛采用,就减少了励磁机这个中间惯性环节,使励磁系统的调节具有快速的特点。但同时也出现了以往比例式或电压比例-积分-微分控制方式与这种快速励磁方式不相适应的情况,使电力系统的阻尼特性恶化,易产生负阻尼,导致电力系统发生低频振荡。为了发挥自并激对控制响应快速的优点并克服上述弊病,20世纪70年代美国GE公司在励磁控制方式上,除保留按发电机端电压偏差的比例-积分-微分环节外,增加了按发电机转速或频率的二阶超前校正环节。这种由单输入发

展成为双输入的控制方式,即电力系统稳定器(power system stabilizer)控制方式,对提高电力系统稳定性有显著成效。

3.2 频率偏差对电力系统的影响

3.2.1 影响频率的因素

从电力系统规划、设计直到运行调度,有一系列的因素,最终都可能对频率带来影响。在规划设计中,电源和负荷间的供需平衡、调峰调频方案的选取,各种类型火力发电厂(包括核电站、燃气-蒸汽联合循环电厂等)、水力发电厂(包括抽水蓄能、径流、具有不同调节能力的水库及梯级开发的电站)因时因地制宜地配置比例是否得当,对运行中系统频率质量有着重大的影响。此外,信息通道的配置合理与否,自动发电控制(AGC)的应用普遍与否,所有这些因素将会在日常的运行中显示出它们对频率的影响。以往某些电力系统曾一度采用降低运行频率,借负荷的频率效应来压低负荷对电力的需求的方法,以求得表面上的电力供需平衡。实际上降低运行频率,不仅降低了发供用电设备的效率,更给这些设备带来累积性的伤害。其中尤为严重的是汽轮机叶片的疲劳损伤和断裂事故,在上述时期内屡有发生,进而加剧了供需矛盾。此时唯一正确的措施是限制部分次要负荷用电、调配负荷曲线、充分发挥电源的作用,尽量减小由于电力电量不足给生产带来的影响。诚然,根本性的解决措施是加速电源建设。又如,日常运行调度的负荷预报,检修及冷、热(旋转)备用的安排,线路检修及网络接线的调配,同样会影响系统运行的频率。当系统出现电源故障(包括电力输送环节的故障)致使系统运转电源不足时,旋转备用、冷备用能否及时投入运行,抽水蓄能机组能否迅速从抽水转换成发电工况,限制对预先协议调荷用户的供电能否实现等,决定着系统频率能否迅速回升至正常值。当系统中大用户由于自身故障等原因,突然中断受电时,调频调峰机组能否及时相应地减小出力,抽水蓄能机组能否快速转换成抽水工况;频率升高过多时,电源的超速保护能否快速切除部分机组,都对保证机组运行安全和系统频率质量起决定性的作用。从频率偏离正常值的允许范围和对设备安全威胁的程度来看,高频率比低频率更具有危害性,必须采取更果断的措施迅速予以遏制。

频率通常有两项控制指标:一是规定系统频率正常允许偏差范围,例如 $\pm(0.2\sim0.5)$ Hz;另一是时钟偏差,例如不超过 $\pm 1\text{s/d}$ 。前者划出了合乎质量要求的范围,发供用电气设备按此标准设计,使电气设备的安全性、可靠性和经济性处于最佳的运行工况范围之内。后者目的在于给累积误差提出一个限制要求,并保证时钟的准确性。某电力系统曾一度采用负荷低谷时按频率允许上限运行,高峰时按频率允许下限运行,利用负荷的频率调节效应缓和调峰容量安排不足的矛盾;时钟的误差亦是借同样的方式调节,来维持误差在一定的允许范围之内。

3.2.2 系统低频率运行对水电厂的影响

在系统运行频率不低于额定值 95% 的波动范围内,水轮机转子转速的下降,使水流和

转子叶片间速率差增大而引起转矩略增,机组出力随之产生少许变动,此时水轮机出力受转速变化的影响不明显,转速变化对辅助设备(包括主轴承油泵、轴承冷却水泵)也都无重大影响。发电机受低频率的影响比水轮机稍大些,其冷却空气流量是转速的函数,空气冷却器的冷却水流循环是由多组电动水泵驱动的,其裕度足以抵偿大幅度的冷却水温变化、水流量减低或者部分冷却器被迫停运等不良影响。低频率运行中,内冷型机组因冷却介质流动速度减慢,降低了冷却效率,而迫使机组出力下降。但水轮发电机组群中采用内冷却的若为数不多,则低频率运行将不至于影响系统中水轮发电机总体的供电能力。水轮发电机组辅助设备的低频率低电压试验表明:水轮发电机组在 87.5% 额定频率、92% 额定电压下能满负荷运行。

从图 3-8 低频率运行时发电能力的变化曲线可以看出,发电能力是随频率的下降成正比地减小,即它们的相互关系为一固定斜率的直线;在电力系统及其负荷容许的低频率运行范围内,水轮发电机组的运行不受什么限制。

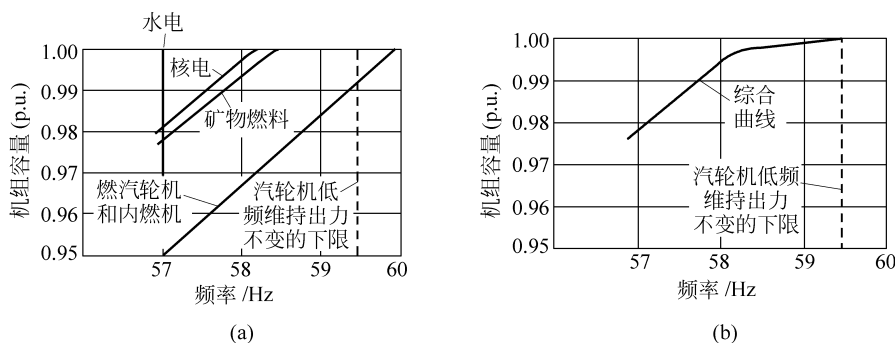


图 3-8 低频率运行时发电能力的变化曲线

(a) 不同类型发电机的出力; (b) 各种类型发电机的综合出力

3.2.3 系统低频率运行对火力发电厂的影响

电力系统运行频率过低,会给电力负荷带来明显的不利影响。即使偏离额定值较少,持续时间不长,也会对设备带来累积损伤,降低生产效率,影响产品质量。其中影响最大的为火力发电厂,尤其是高温高压电厂。因为负荷在频率下降时,负荷将减少从系统吸收的功率,其频率调节效应将促使频率回升。火力发电厂则不然,系统频率的下降,将导致电厂辅助机械出力减小,继而发电出力下降,从而使系统频率下降更多,对系统频率崩溃起着推波助澜的作用。

系统低频率运行,对各类火力发电厂的影响差别很大。下面将分别讲述蒸汽、燃气及内燃机驱动的发电机组所受的影响。影响的程度是由频率下降的幅度及其持续时间共同确定的。短暂的 1~2s 频率下降和数分钟的持续低频率,影响完全不同。长达数分钟甚至数十分钟的低频率,将导致发电机组冷却系统出力下降引起的设备过热、振动,尤其是共振应力引起的汽轮机叶片疲劳和损伤、发电机电动势的降低等,均需分别采取防范措施,并视机组的设计、已运行的年限等作不同的处理。