

内 容 提 要

本书是电能质量技术丛书的第二分册,从频率的基本概念出发,对电力系统频率偏差影响,频率控制、检测 and 标准等几方面,结合我国电力系统运行实例和国际上的相关经验,作了系统的、深入浅出的论述,是迄今为止国内第一本专门介绍电力系统频率特性的读物。

本书写得有理、有据,深入浅出,说明问题清楚,可供电力科研、设计部门,电厂和供用电部门的管理人员、技术人员以及工人阅读,也可作为大专院校和专业培训的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统频率/蔡邻编著. -北京:中国电力出版社, 1998

(电能质量技术丛书;第2分册)

ISBN 7-80125-581-X

I. 电… II. 蔡… III. 电力系统-频率 IV. TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第27374号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 邮政编码 100044)

北

名

1998年5月第一版 1998年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 4印张 87千字

印数 0001—3080册 定价 5.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

电能的质量——频率和电压（包含偏差、三相对称性、波形畸变率、波动和闪变等）是电能生产、消费必须具备的质量检验指标。随着生产技术的发展，生产过程对电能质量的要求逐步在扩大和深化。从初期对电压、频率有一较宽的允许偏差范围，渐渐扩大到对三相电压的不对称度、波形畸变率及电压波动和闪变的限制等诸多质量指标的要求，电压、频率允许偏差的范围也视系统的特性（例如容量等）有着不同的规定。对质量的要求，越来越强调适应广大负荷及大容量发电机组的需求，另一方面又要求尽量减小负荷对电能质量的污染（例如大型冲轧设备、电冶炼设备、单相牵引设备及换流设备引起的电压闪变、谐波污染和三相不对称等）。

电能质量指标的确定是质量、安全、经济三方面综合优化的结果，不是质量标准越高越严越好，而是要求综合优化、指标适度。质量、安全、经济之间有着内在的联系。安全和质量看似纯技术范畴的事，实际上处处事事都隐含着经济。为了较清晰地理解三者的依存关系，可将这三方面视为三个集合，用图 0-1 实际可能并能进一步优化的解决问题的交集表示。

图 0-1 表明，质量标准的确定是在安全、质量两个要求最低限集合和经济（费用）允许最高限集合的交集之内，即寓于实际可能存在并可进一步优化的空间之中。下面各章节对电力系统频率的诸多阐述，都是紧密与这三个集合相联系并受其制约的，即如何创造条件使电力系统运行范围不出上述

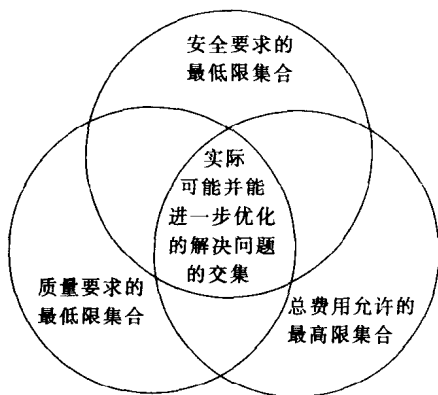


图 0-1 实际可能并能进一步优化的解决问题的交集

的交集。例如系统低频率运行工况下的按频率减负荷，使运行点回复到交集之内，就是一例。

我国长期经历过电力建设赶不上国民经济发展需要的年代，有着低频率运行的惨痛教训。近年来，电力建设速度加快，取得令人瞩目的成就。例如华北电力系统按计划完成了“9511”工程，开始实现对北京居民不停电的承诺。但解决频率质量问题，电源装机与负荷供需平衡仅是解决这个问题的基础。网络布局和运行调度是否得当，自动控制调节装置、防止和遏制系统事故的措施是否齐备以及运行可靠性等均起着难以替代的作用。因此，研究运行中频率偏差的允许范围，不仅在系统电源短缺时十分需要，而且在电源富余时，为了研讨防止系统事故及系统瓦解后的恢复策略，同样也有必要，更何况保持频率在适度的偏差范围内运行还有着十分重大的经济效益。本书作为电能质量技术丛书的频率部分，旨在系统

地论述这方面的问题。

本书共分五部分。

(1) 有关频率的一些主要概念：作为全书关于电力系统频率允许偏差及如何保证在允许范围内运行的基础。

(2) 频率偏差对电力系统的影响：分别就频率偏差大小、变动速度、持续时间对各类电源及各种负荷的影响作概括的说明，进而综合论述频率偏差对电力系统运行的影响。

(3) 电力系统频率的控制：即如何实现电力系统运行在频率允许的偏差范围之内，它涉及到如下内容。

1) 正常控制——正常运行工况下，包括电力系统调度对系统电源、负荷及电网接线计划安排在内的系统频率控制调节。

2) 紧急控制——异常运行工况下，如何及时采取对策，如快速启动备用机组、短时限制某些不重要用户的用电量等，使系统频率恢复到正常允许的频率偏差范围之内。

3) 危急控制——电力系统故障时，如何迅速地采取措施，按故障发展的危急程度和趋势，采取快速切除负荷或电源机组、投入或切除抽水蓄能机组、或使局部系统从大系统中解列等某一种或某几种措施，旨在力求最终达到系统恢复正常所需时间最短，使在计及负荷的重要性顺序后，损失负荷的数量和持续时间尽可能地最小。

(4) 电力系统频率的检测和评价：电力系统的频率即使在系统正常运行工况下，也不是恒定不变的，而是在不断变动着，且系统中各节点的频率在同一瞬间也不是完全相等，只能是概率统计涵义上的相等。系统异常，尤其是系统故障时各节点的频率更是有显著的差别。因此，在系统频率的检测和评价上有必要进行较深入的研讨。

(5) 讨论电力系统频率允许偏差的确定及国外有关电力系统频率的规定和研究：综合前四部分所述，并参照国外有关规定和研究成果，进而阐述对 GB/T 15945—1995《电能质量 电力系统频率允许偏差》国家标准的理解。从这个角度看，这部分相当于全书的总结。

全书的结构及其内在的联系，如图 0-2 所示，权作本书的索引。

本书是在主编林海雪高级工程师（教授级）的督促和帮助下，利用业余时间断断续续写就的。初稿完成后，由沈善

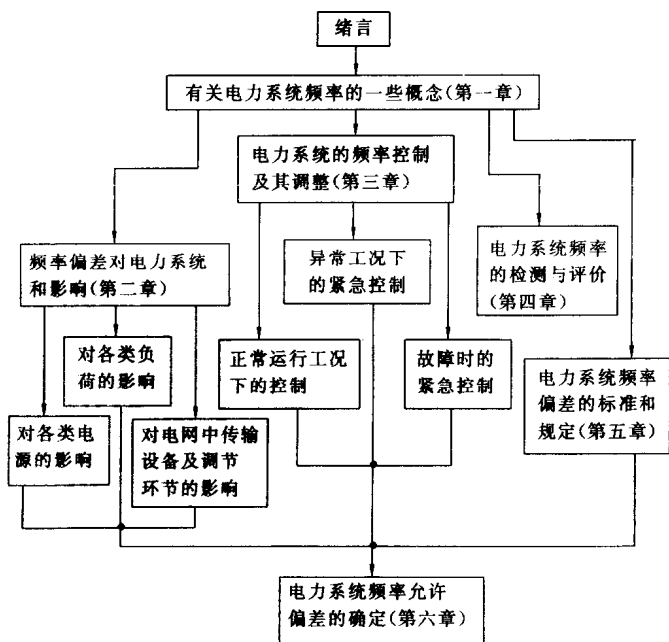


图 0-2 全书结构及其内在联系框图

德教授进行了审阅并提出了许多宝贵意见。在此，十分感谢他们的辛勤劳动。写作时间虽然耗费不少，但却是零星的时间累加而成的，因而又显得十分仓促。倘能获得读者们的批评指正，使本书在纠正错误和疏漏中完善起来，进而对读者在了解电力系统频率方面有所帮助，则是一大幸事。

编著者

1996 年 12 月

丛 书 前 言

随着我国国民经济的蓬勃发展、电力网负荷急剧加大,特别是冲击性、非线性负荷容量的不断增长,使得电网发生电压波形畸变、电压波动、闪变和三相不平衡等电能质量问题。这些项的数字特征量和标准是评定电能质量的重要指标,也是电力技术工作者选用补偿方法、装置和技术措施的依据。

编写一套电能质量技术丛书,是许多供用电工作者的愿望,经孙树勤教授推荐,得到中国电力出版社的支持,由电能质量系列国家标准的主要起草人林海雪高级工程师(教授级)作为本丛书主编。针对业已制订的五项电能质量国家标准,丛书也分为五个分册。丛书主编和各分册的作者皆多年从事该问题的研究,从所掌握大量国内外的文献资料、参加实践所积累的丰富经验以及指导科研所获得的成果中,概括出处理该问题的脉络而编辑成书。电能质量的重要性与日俱增,所以当前编写这套丛书显得特别及时有用。

这套丛书的各分册相互联系,而每一分册又能独立成书并都有其独到之处,丛书的编著具有较高的学术水平和实用价值。限于篇幅仅以第四分册为例,说明本丛书的这一特点。该分册以大量观察者对闪变反应所形成的单位闪变曲线为出发点,进而用自动控制理论的传递函数来表达此曲线,以此作为基础探讨闪变的检测和预估方法,指导检测仪器的研究和开发,阐述闪变标准的制订和采取补偿措施等,使全书形成一个能提供给读者从头至尾阅读的独立分册。

研究电能质量并制订标准的目的是作为管理和补偿的判

据。首先需要找出负荷的变动量及其对电能质量的影响，然后采取对策。但补偿方法繁多，丛书作者通过系统论述对各种方法进行比较，找出内在联系，结合以实验为基础所作的假定，力求对负荷补偿问题总结出一些具有指导意义的原则。负荷补偿是一个复杂的、内容多样化的问题，特别是以三相系统为主要无功补偿对象的情况，不但牵涉到电压波动、闪变、谐波、频率变动，而且增加了三相不平衡这一因素。为求经济有效，从实用的角度出发，目前负荷补偿的指导原则是采用工程处理方式，即对三相作综合考虑。假定三相为简单对称，即电源电压为三相对称的正弦波，利用坐标变换，例如将不平衡三相电流变换到 d, q, o 坐标系中，其中电流的 d 轴直流分量反映三相基波有功功率。在总电流中排除此电流分量后，余下的电流、结合各次谐波电流都作为被补偿对象统筹处理。显然在此领域中尚有大量研究和实践问题有待进一步深入探讨。

丛书的取材和编写就是按上述思路而安排的。在叙述上力求条理清楚，深入浅出并且益以实例，以便于读者接受和应用。丛书所论述的问题不但会引起我国电力部门和有关科研部门的重视，而且在供电资源丰富的工业国家也将这一问题提到日程表内，显然必将继续发展。丛书对此问题系统、深入地总结了近年来的研究和实践成果，相信它将有损于从事这一领域的科技工作者开展工作。

唐统一

1996 年 12 月

目 录

丛书前言

序 言

第一章 频率的概念	1
第一节 交流电的频率	1
第二节 频率的基本属性	1
第三节 电力系统频率, 电源频率和负荷节点频率	3
第四节 标称频率	4
第五节 频率偏差	5
第六节 频率波动	5
第七节 电力系统的频率特性	6
第八节 频率突然下降及崩溃	14
第九节 频率与电压的关系	16
第二章 频率偏差对电力系统的影响	19
第一节 影响频率的因素	19
第二节 系统低频率运行对火力发电厂的影响	21
第三节 系统低频率运行对水电厂的影响	26
第四节 系统低频率运行对负荷的影响	27
第五节 冲击负荷引起的电力系统频率波动	42
第六节 电力系统高频率运行的危害	45
第七节 小结	48
第三章 电力系统的频率控制及其调整	50
第一节 系统正常工况下的频率调整	50
第二节 系统异常及故障工况下的频率调整	66

第三节	小结	81
第四章	电力系统频率的检测与评价	83
第一节	电力系统频率的四种运行工况	83
第二节	电力系统的动态频率	85
第三节	电力系统频率的检测	87
第四节	电力系统频率的评价	89
第五章	电力系统频率偏差的标准和规定	92
第一节	国内外有关的标准和规定	93
第二节	电力系统频率偏差标准和规定的讨论	101
第六章	电力系统频率允许偏差的确定	104
第一节	频率偏差的动态属性	104
第二节	发电、输变电设备及负荷对系统频率质量 的要求	105
第三节	电力系统频率允许偏差确定的原则	108
第四节	我国电力系统的频率允许偏差及标准 评价	111
参考文献		115

第一章 频率的概念

“频率”主要具有三种涵义：一是在单位时间内，一个事物作周期性运动的次数，相当于英文“frequency”。二是在相同条件下，试验成功的次数与试验总次数之比，称为事件成功的频率，相当于英文“probability”；三是在统计分析中，分配数列各组出现的单位数。电频率具有上述第一种涵义。

第一节 交流电的频率

电工学定义交流电在 1s 内正弦参量交变的次数为频率 (frequency— f)，其单位为赫兹 (Hertz)，记为 (Hz)。交变 (正负变化) 一次所需的时间称为周期 (T)。频率和周期互为倒数。

频率是对单位时间内连续变量进行的计量，要求被测系统是一个相对稳定的动态系统。因此，当系统在受到某种原因的干扰而失去均衡的过程中，定义的有效性就必然难以应用。曾有学者为此提出了动态频率概念的定义^[6]，这将在第五章中讨论。

第二节 频率的基本属性

交流电的频率是和发电机组转速直接相对应的电频率。其关系式为

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

式中 p ——发电机电极对数；

n ——机组每分钟转数。

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，写成标么值表示的关系式为

$$\left. \begin{aligned} T_J d\omega/dt &= M_m - M_e - D(\omega - 1) \\ d\delta/dt &= \omega - 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 T_J ——机组惯性常数，s；

δ ——转子 q 轴与以同步速旋转的坐标实轴之间的夹角，rad；

M_m ——机械转矩；

M_e ——电磁转矩；

D ——机械阻尼系数；

ω ——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，往往难以检测到实际频率。

系统中综合负荷的频率特性（负荷功率与频率的关系）是非线性的。只有在频率作小范围内的变动时，可近似地视为线性。在考虑系统作动态意义上的变动时，则不能忽视其非线性的作用。这一属性对系统的动态过程分析至为重要。我们将在本章的第七节进一步讨论这一问题。

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。系统中电源机组将

按各自电动势 E 对节点 a 的电气距离成反比地，亦即按各自同步功率 $\frac{\partial P}{\partial X}$ 来分担负荷增量 ΔP ，并以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，频率作相应的降低。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。紧接着由系统事先安排的调频机组增加出力来求得系统功率的平衡。在整个过程中，各机组的转速，因各自初始承担的负荷不同和调差系数的差别，使机组的新增负荷功率不停地改变着分配比例，各电源机组频率围绕着系统等值惯性中心频率变化方向的轴线振荡，并随之下降和回升，逐渐和等值惯性中心的频率趋于一致，最终回到系统正常运行频率偏离的范围之内。

第三节 电力系统频率，电源频率 和负荷节点频率

电力系统在稳定运转的状态下，负荷功率的增减，发电机出力的变动，一直不间断地发生着，所属设备的操作也时有发生，正如上节提到的负荷突增事例一样，这就使系统中不同节点的频率产生不同程度的波动。这种波动是企求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，即从概率统计的意义上各节点的频率是相等的，并在作同步的变化。在这样的条件下，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和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，实际上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，或几十分之几。在这种惯性动态支撑下，负荷群失去电源之后的几十毫秒内，在残压的衰减过程中，伴随着频率的衰减。过去防止负荷电压反馈引起按频率减负荷装置误动而增加的延迟动作时间，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，或已失步及失步后转入再同步的过程中，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”，可用来作为分析系统工况的一个参量。但就“系统频率”而言，已越出了传统的频率定义论域，而失去定义的含义。

第四节 标 称 频 率

交流电力系统的标称频率有 50Hz 和 60Hz 两种。我国采用的是 50Hz。50Hz 及 60Hz 频率的系统若要并联运行，需通过背靠背直流换流站或变频机组转换频率。

发电机组和用电设备铭牌上均标有标称频率 (specified frequency)，即标明该设备应在该频率的电力系统中使用。额定频率 (rated frequency) 与标称频率涵义相同，两者相互通用。

第五节 频 率 偏 差

电力系统正常运行工况下，应在标称频率下运行。因为系统中直接相连的所有电气设备，在设计时都是优先按标称频率来保证设备运行的可靠性和经济性。但正如第三节所述，电力系统负荷在不断变动其大小，电源出力及其调节系统追随负荷变化又有一定的惯性，致使系统频率总是一直处于变动的状态之中。因此，运行中必须对运行频率不可避免地偏离标称值，划出允许的偏差范围，以确保运行的可靠性和经济性。

国标 GB 1980—80《电气设备额定频率》规定设备的额定频率允许偏差值为 $\pm 1\%$ 。国标 GB 7064—86《汽轮发电机通用技术条件》规定发电机的频率变动范围为 $\pm 2\%$ 。两个标准允许的偏差范围有较大差别。这是因为用户要求系统提供的电能质量高一些，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，是十分合理的。同样，在供电方条件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。

第六节 频 率 波 动

电力系统中的负荷一直处在变动之中。有经验的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

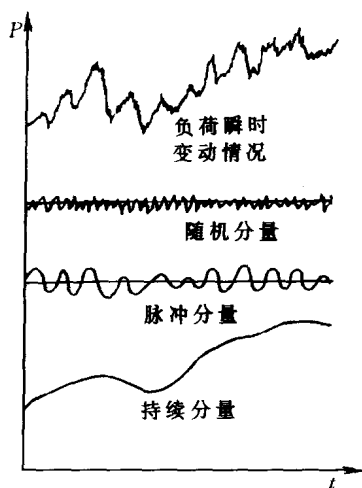


图 1-1 电力系统负荷变化的分解示意图

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，负荷瞬时典型的变化由三部分组成：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，如延压机械、电炉和电气机车等；三是变化十分缓慢的持续分量并带有周期规

律的负荷，这大都是工厂的作息制度、人民的生活习惯和气象条件的变化等造成的，这是负荷变化中的主体，负荷预测中主要就是预报这一部分。图 1-1 为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) 是从动的，对其起主要影响的是负荷波动中上述后两个变化分量。

第七节 电力系统的频率特性

电力系统概括地说，是由电源机组、输变电网络和负荷组成。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,电力系统就成为发电机组和负荷两个环节的能量控制闭环系统。研究其频率特性,即功率与频率的关系,可先分别研究这两个环节的,然后再综合成系统总体的。

一、电力系统的频率静态特性

1. 电力系统负荷的频率静态特性

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

$$P_L = f(f) \quad (1-3)$$

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) 与频率变化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) 与频率变化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) 与频率变化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) 与频率变化更高次方成正比的负荷,如静水头阻力很大的给水泵等。

负荷的功率频率静态特性一般表示式为

$$P_L = a_0 P_{LN} + a_1 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right) + a_2 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^2 + a_3 P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^3 + \cdots + a_n P_{LN} \left(\frac{f}{f_N} \right)^n \quad (1-4)$$

式中 f_N ——标称频率;