

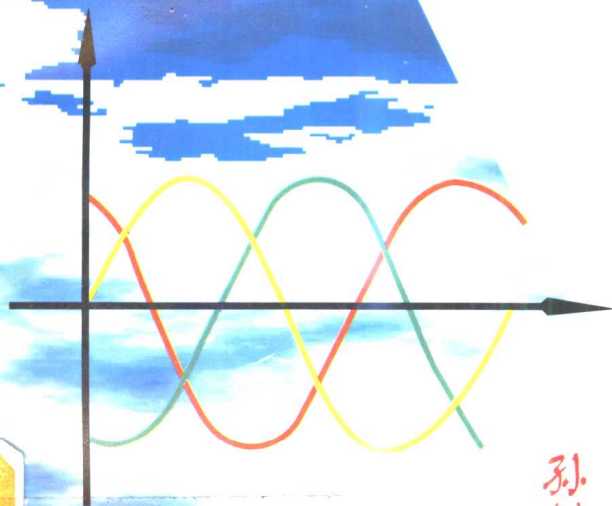
第四分册

电压波动与闪变

孙树勤

编著

电能质量技术丛书



14
K

中国电力出版社

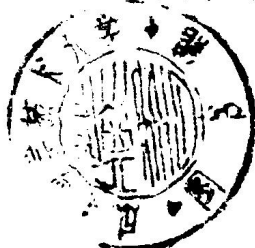
992772



第四分册

电压波动与闪变

孙树勤 编著



中国电力出版社

内 容 提 要

本书是电能质量技术丛书的第四分册。

全书共分六章，分别论述了电压波动和闪变的定义及基本概念；闪变的测量和兼容标准；电弧炉发生的闪变预测；预测闪变的单位闪变曲线法和解析法；负荷补偿的技术措施等。

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

电压波动与闪变/孙树勤编著. -北京: 中国电力出版社, 1998. 1

(电能质量技术丛书; 第 4 分册)

ISBN 7-80125-583-6

I. 电… II. 孙… III. ①电压-变化②闪络 IV. TM714. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 27378 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

1998 年 4 月第一版 1998 年 4 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 5.625 印张 123 千字
印数 0001—3080 册 定价 6.50 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)

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

34012/1705

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

序 言

本书所阐述的电压波动和闪变是电能质量的重要指标之一。它主要反映在稳态运行的工况下,波动性负荷能引起供电系统的电压波动,该电压波动可能危害电气设备并引起照明闪变。自动控制设备和高性能的家用电器的供电,对于电压波动和闪变,多采用稳压电源、电力调压器(power line conditioner)或不停电电源(UPS)来解决,对此已有一些专著阐述。为配合闪变的国际电工标准^[1]和国家标准^[4]的贯彻执行,本分册主要讨论大功率波动性负荷发生的闪变干扰与其他负荷之间的电磁兼容和负荷补偿等技术问题。

为了对电压波动和闪变进行研究,UIE、CIGRE 和 CIRED 等国际学术会议组织分别成立专家工作组,将其作为一项专门问题来研究并已发表许多论著;由于工程发展的需要,已经制订了电能质量的国家标准和国际电工标准。本书作为电能质量技术丛书的第四分册,对于电压波动和闪变及其发生的过程给予一个严谨的概念,同时还给出计算、预测和补偿电压波动和闪变的基本方法。另外,编写时综合有关文献联系实际,来阐述文献中各种方法的内在联系和基于实验事实所作假定的科学依据等内容,以求将其提高到适当的理论水平来表述,进而权衡叙述的广度和深度。

本书第一章着重有关电压波动和闪变定义和基本概念的研讨,并且注意联系和表述这些定义和概念的各量的基本关系式的建立。首先将电压波动抽象地看作是工频供电电压的调幅波,从理论上阐述电压波动和闪变的定义;再以分组观

察者的闪变觉察率试验的基本实验事实作为依据，概括出单位闪变曲线。根据自动控制理论将电压波动与人对照度波动的闪变视感度的关系加以概括，建立灯-眼-脑环节的传递函数。从波动性负荷所发生的闪变允许值和受危害设备的抗闪变干扰阈值来表述负荷的闪变兼容，阐述制订闪变标准的原则；由电路分析建立波动性负荷的无功功率变动量与电压波动的基本关系式，表述负荷补偿的基本概念。这样，以第一章作为全书总的概括阐述，将有助于以应有的深度去研讨以后四章的内容。

第二章和第三章分别介绍日本、美国、IEC 和我国的闪变仪和闪变标准，概括地介绍各闪变仪对调幅波检测方法的区别和共同特点，举例介绍制订闪变标准的原则和执行标准的灵活性。制订闪变标准需先建立闪变兼容值，作为规定用户发生闪变允许值的基准。闪变兼容值是为保证电能质量对供电部门和用户的要求、承诺；而用户发生闪变允许值，原则上要根据用户协议负荷与其供电系统总供电能力的比例来作分配。

第四章，鉴于电弧炉在各类波动性负荷中对闪变影响最大并且又是供电系统中较为重大的波动性负荷，所以用一章篇幅介绍由它所引起的闪变及其预测方法。对于电弧炉这类随机变化的波动性负荷，若采取以统计平均量来表述，这却常能给出很有实用价值的分析结果和应用算式。

在附录 B 中给出闪变兼容值的经验换算式，将几种闪变预测的算式联系起来。鉴于第四、五章多处采用标么值和选用不同的电压和容量基值，将其列在书后的附录 C 中以便于查阅。

第五章介绍 UIE 专家工作组作为国际学者共同研究的

成果,对于单纯规则的电压波动,采用解析法和简捷方法来预测波动性负荷的闪变。为此介绍较多的计算实例,以便于读者掌握和运用。在介绍这些方法时,都以单位闪变曲线作为依据,表述它们的内在联系。

第六章针对大功率波动性负荷所引起的电压波动和闪变,介绍负荷补偿的技术措施,其中主要介绍有关快速响应的静止无功补偿器(SVC)和静止无功发生器(SVG)。对于静止无功发生器,仅重点介绍矢量变换控制方法,其要点是假定以对称三相正弦交流电压供电,通过矢量变换,用撇除电流基波有功分量的补偿电流矢量作为控制变量,来补偿三相波动性负荷的无功功率变动量。因为不论采用哪种补偿措施,都要以不影响供电系统运行的稳定性为前提,所以在介绍这些补偿器时,都同时注意介绍它们的优缺点和局限性。在书后的附录D中,对本书所用的矢量变换作了归纳。

为便于读者查阅,将主要字母符号说明列于书前,在书后列有附录和主要参考文献。

本书的内容和方法是针对提高电能质量来选择的,希望能引起从事供用电技术工作的同行们的兴趣。但遗憾的是,对于电压闪变至今尚未建立对各种电工设备都可普遍应用的算式。为此请读者务必注意,在采用本书所提供的资料时,需分析它的假定条件与所应用的情况是否一致,以免得不到预期的效果,甚至发生适得其反的效果。近年来已有些学者研究用小波变换(wavelet transforms)和人工神经网络(artificial neural networks)来分析电能质量,本书尚未引入。

在编写本书时曾得到唐统一教授,瞿昆琦、林海雪、李平之和许遐教授级高级工程师和何学农博士的热心帮助并提供资料。承唐统一老师对本书初稿仔细审阅,指导作者修改

并为丛书作序。主编林海雪教授级高级工程师积极负责促使本书得以完成。在此一并表示衷心感谢。限于水平，书中如有错误和欠妥之处，请读者指正。来信请寄至北京清华大学电机系（邮政编码：100084）。

编著者

1996 年 12 月

主要字母符号说明

一、电流的符号

i	瞬时值(A, kA)
I	方均根值(有效值)
I_m	最大值(峰值)
$\dot{I}$	相量
$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix}$	矢量(列矩阵)

二、电压的符号

u	瞬时值(V, kV)
U	方均根值(有效值)
U_m	最大值(峰值)
U_N	额定电压, 标称电压
$\dot{U}$	相量
$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix}$	矢量(列矩阵)
v	波动电压(调幅波)的瞬时值(%)
V	调幅波的方均根值(%)
ΔV	调幅波的峰谷差值(%), 电压变动(%)
V_d	短路压降(%)

ΔV_{10}	折合成 10Hz 的闪变值(%)
ΔV_F	ΔV_{10} 闪变仪的读数
ΔV_e	稳态的电压变动和电压波动 ΔV 值
ΔV_{max}	电压变动特性的最大电压变动

三、其他量的英文字母符号

A_{lt}	长时间等值严重度指标(p. u.)
A_{st}	短时间等值严重度指标(p. u.)
a_f	视感度系数
C	电容($\mu F, F$)、闪变兼容值(p. u.)、补偿率(%)
E	发生闪变的允许值(p. u.)
f	频率(Hz)
F	闪变觉察率(%), 电压变动的等值系数、闪变干扰的重叠因数
a	$e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$
$\text{Im}()$	取()的虚部

j	$\sqrt{-1}=e^{j\frac{\pi}{2}}$
$K(f)$	视感度系数、灯-眼-脑环节的频率特性
$K(s)$	灯-眼-脑环节的传递函数
L	电感(mH、H)、闪变规划值(p. u.)
N	匝数
p	瞬时有功功率(W)、概率(%)
P	有功(平均)功率(kW、MW)
P_i	第 <i>i</i> 个用户的协议负荷(kW、MW)
P_t	供电系统的供电能力(kW、MW)
P_{lt}	长时间闪变严重度(p. u.)
P_{st}	短时间闪变严重度(p. u.)
q	瞬时无功功率(var)
Q	无功功率(Mvar)
r	频度(1/s, 1/min, 1/h)
R	电阻(Ω 、p. u.、%)、频率系数
$\text{Re}()$	取()的实部
S	视在功率、容量(kVA、MVA)、瞬时

	闪变视感度(p. u.)
S_B	容量基值(MVA)
S_k	供电系统的短路容量(MVA)
S_d	用电设备的短路容量(MVA)
S_N	用电设备的额定容量(kVA、MVA)
t	时间(ms、s、min、h)
Δt_i	记忆时间(ms)
T	周期(s)、闪变干扰的传递系数
X	电抗(Ω 、p. u.、%)
Z	阻抗(Ω 、p. u.、%)
z	阻抗的模(Ω 、p. u.、%)

四、希腊字母符号

α	控制角($^\circ$ 、rad)
δ	功率角($^\circ$ 、rad)
Δ	某些量的微小变化
η	效率(%)、闪变改善率(%)
σ	导通角($^\circ$ 、rad)
τ	时间常数(ms、s)
φ	阻抗角或功率因数角($^\circ$ 、rad)
$\lambda, \cos\varphi$	功率因数
ω	角频率(rad/s)
Ω	调幅波的角频率(rad/s)

五、缩写字

CIGRE	国际大电网会议
CIREN	国际供电会议
EMC	电磁兼容
IEC	国际电工委员会
UIE	国际电热协会
UNIPED	国际发配电协会
APF	有源电力滤波器
CPF	累积概率函数
FC	固定并联补偿电 容器组
FB	电弧炉变压器— 次母线
GTO	可关断晶闸管
GTR	电力晶体管

IGBT	绝缘栅双极晶体管
PCC	公共供电点或公共连 接点
PF	功率因数
p. u.	标么值
PWM	脉宽调制
scvd	短路压降
SR	饱和电抗器
SVC	静止无功补偿器
SVG	静止无功发生器
TCR	晶闸管相控的电抗器
TCT	晶闸管相控的高阻抗 变压器
TSC	晶闸管投切的电容器

目 录

丛书前言

序 言

主要字母符号说明

第一章 定义和基本概念	1
第一节 电压变动	1
第二节 电压波动	4
第三节 闪变	7
第四节 灯-眼-脑环节的传递函数	23
第五节 闪变的发生和危害	28
第六节 闪变的电磁兼容	29
第七节 波动性负荷的无功补偿	31
第二章 电压波动和闪变的测量	36
第一节 电压波动的检测方法	36
第二节 日本的 ΔV_{10} 闪变仪	41
第三节 英国的 ERA 闪变仪	44
第四节 IEC 推荐的闪变仪	46
第五节 我国闪变仪的制作示例	49
第三章 电压波动和闪变的标准	52
第一节 电力网中闪变干扰的传递	52
第二节 闪变的兼容值和规划值	53
第三节 发生闪变干扰的允许值	55
第四节 发生闪变干扰允许值的分配和评定	57
第五节 日本的闪变标准	61

第六节	英国的闪变标准	62
第七节	闪变的国家标准	65
第四章	电弧炉发生的闪变	68
第一节	引言	68
第二节	电弧炉的电路分析	69
第三节	电弧炉闪变的预测	74
第四节	多台电弧炉的闪变预测	80
第五节	直流电弧炉发生的闪变	85
第五章	闪变的简捷预测方法和实例	89
第一节	单位闪变曲线法和解析法	89
第二节	电动机起动的闪变简捷预测	100
第三节	间歇通电负荷的闪变预测	103
第四节	电焊机的闪变预测	105
第五节	电动机拖动设备的闪变预测	111
第六节	变流器供电拖动设备发生的闪变干扰	118
第六章	负荷补偿的技术措施	122
第一节	概述	122
第二节	晶闸管投切电容器(TSC)	126
第三节	晶闸管相控电抗器(TCR)	128
第四节	饱和电抗器(SR)	135
第五节	矢量变换控制的 SVC 和 APF	141
附 录		149
附录 A	白炽灯的闪变觉察率	149
附录 B	闪变兼容值的经验关系式	153
附录 C	标么值和其基值的选择	154
附录 D	本书所采用的矢量变换	156
参考文献		163

第一章 定义和基本概念

第一节 电 压 变 动^{[1],[3]}

一、快速的电压变动(rapid voltage change)

供电电压在两个相邻的、持续一定时间的电压方均根值 U_1 和 U_2 之间的差值,称为电压变动。在不超过 30ms 的期间内,同方向的二次或二次以上的电压方均根值的变动,只算作一次变动。换句话说,在同方向小于 30ms 的快速变化不计入电压变动^[1]。通常多以额定电压 U_N 的百分数来表示电压变动的相对百分值 ΔV ,即

$$\Delta V = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100 \quad \% \quad (1-1)$$

典型的电压变动特性,如图 1-1 所示。在 t_1 电压的方均根值开始下降,至 t_2 电压下降至 $\Delta V_{\max}$,为电压变动特性的最大电压变动。从 t_2 开始电压回升,至 t_3 电压持续稳态低值, ΔV_c 为稳态的电压变动。从 t_4 开始电压回升到正常值。

图 1-2 为工频电压峰值变动示意图,图中①为电压变动值 ΔU ,在图中共有 7 次变动;②为电压变动期间(duration of the voltage change),即电压由初值上升(或下降)至终值变动一次的时间 Δt ;③为电压变动时间间隔(voltage change interval),即由一个电压起始变动至下一个电压起始变动所经历的时间间隔。

单位时间内电压变动的次数称为电压变动的频度 r ,一

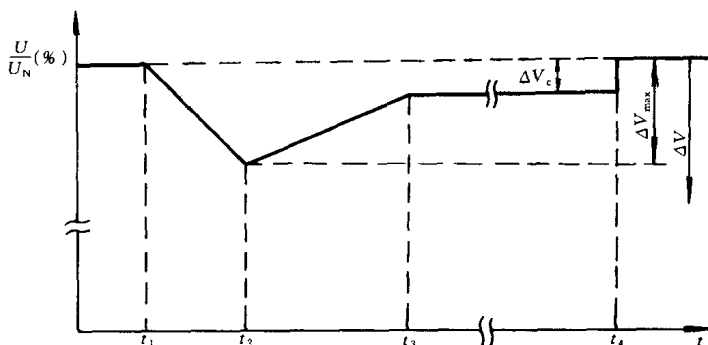


图 1-1 典型的电压变动特性

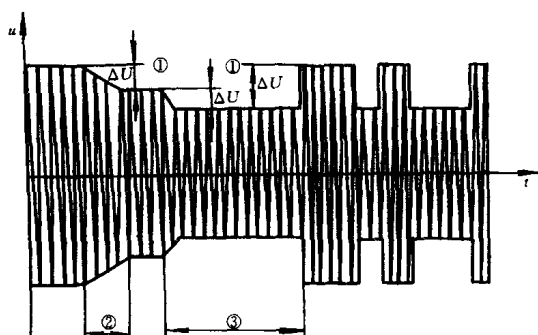


图 1-2 工频电压峰值变动示意图

般以 1/min 或 1/s 为单位，图 1-3 为其统计示例。如前所述，同向电压变动时间间隔 $\leq 30\text{ms}$ 者不算电压变动，如图 1-3 中 t_{12} 内所示。在图 1-3 中 ΔV_z 为在时间 t_z 内的周期性电压变动值，在 t_z 内共有 7 个电压变动，图中 ΔV_1 至 ΔV_5 计有 5 个非周期性的电压变动值。

严格地说，只有正弦波周期 T (s) 的倒数，才称为频率 f (Hz)。在实际应用中，对周期为 T (s) 的矩形波或三角波等变化的波形，也将其周期 T (s) 的倒数称为该波形的频率

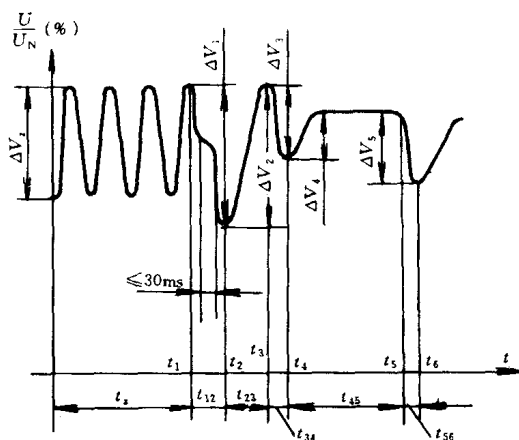


图 1-3 电压变动的频度统计示例

f (Hz), 实际上 f (Hz) 应当是这些波形的基波频率。电压变动的频度 r (1/s), 则为频率 f (Hz) 的 2 倍。常用的关系式为

$$f(\text{Hz}) = \frac{1}{T(\text{s})} \quad (1-2)$$

$$f(\text{Hz}) = \frac{r(1/\text{s})}{2} = \frac{r(1/\text{min})}{120} \quad (1-3)$$

国际电工标准 (IEC) 规定, 在低压民用电力网中, 稳态的电压变动 ΔV_c 应不超过 3%, 最大的电压变动 $\Delta V_{\max}$ 应不超过 4%, 电压变动 ΔV 超过 3% 的持续时间不应超过 200ms。手动开关操作或每小时不多于 1 次的电压变动, 可将上述限值放宽, 并乘以 1.33 的系数。

二、电压偏差(voltage deviation)

供电系统总负荷或其部分负荷正常改变, 导致供电电压