

# 基于典型光源电气特性的综合照明负荷建模

季尚进<sup>1</sup>,陈宇杰<sup>1</sup>,吴浩<sup>1</sup>,孔剑虹<sup>2</sup>,金宇清<sup>3</sup>,鞠平<sup>3</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027;2. 飞利浦照明电子(上海)有限公司,上海 200000;  
3. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**2022年我国电力系统的照明负荷用电量占比高达12%,且基于电力电子技术的照明电器已成为照明市场的主流,因此,亟需研究当代照明负荷的综合模型。系统地研究了电力系统照明负荷综合模型。针对热辐射、气体放电以及发光二极管3种主流光源技术的典型照明负荷,基于各自的电气特性并采用聚合等值方法分别建立各类照明负荷的综合模型,并给出模型的典型参数范围;基于各类照明电器的市场占比,建立电力系统照明负荷的综合模型;提出了适用于BPA软件的电力系统照明负荷实用近似模型,并通过数值仿真分析了所提照明负荷模型在暂态过程中的特性,验证了该模型的实用性与合理性。

**关键词:**负荷模型;照明负荷;典型光源;电气特性;数值仿真

**中图分类号:**TM714;TM923

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202412031

## 0 引言

在电力系统暂态分析中,负荷模型的准确性对计算结果的可信度有很大影响<sup>[1]</sup>。照明负荷作为极常见的电力系统负荷,虽然单体功率极小,但其数量巨大,因而累积功率很大。以2022年为例,我国照明负荷在全社会用电量中的占比高达12%<sup>[2]</sup>,对电力系统综合负荷特性的影响难以忽视,因此有必要研究照明负荷的综合模型。

当代照明负荷根据其光源的发光原理,主要分为以下4类:热辐射照明、气体放电照明、发光二极管(light emitting diode, LED)照明和有机发光二极管(organic light emitting diode, OLED)照明。白炽灯作为典型的热辐射照明电器,具有通用性好、成本低等优点,曾广泛用于各类场所,但由于光效低、寿命短等缺点,已逐渐被其他光源类型的照明电器所替代。荧光灯作为典型的气体放电照明电器,光效和寿命较白炽灯有较大提升,而替代传统电感镇流器的电子镇流器能降低功耗约20%,故目前仍用于各类场所。随着技术的发展,LED灯的光效与性价比已超过大多数白炽灯和荧光灯,近十年来其市场渗透率由3%上升至80%,已成为主流照明技术。基于OLED的照明技术大多用于电子显示行业,目前市场占比很小。综上,可以认为,当代电力系统照明负荷由少量的热辐射照明负荷、大量的气体放电照明负荷和LED照明负荷所构成。

从电气特性上来看,不同于传统白炽灯,具有驱

动电路的LED灯有很强的控制特性,能使其有功功率在正常电压波动范围内近乎不变。因此,当代照明负荷具有显著的电力电子化负荷特征<sup>[3-6]</sup>,亟需研究其特性,并建立其综合负荷模型。

从电力系统负荷建模角度看,除了少量研究将照明负荷建模为多项式或幂函数形式的静态负荷模型<sup>[7-9]</sup>外,传统研究很少考虑新型照明的特性。

现有研究主要针对单个照明电器,建立其负荷模型。针对热辐射照明,文献[10]的研究表明,白炽灯的稳态有功功率特性可较好地用恒阻抗与恒电流的负荷特性描述。针对气体放电照明,文献[11]的研究表明,荧光灯的有功功率特性可较好地用恒电流特性描述,无功功率特性可近似用负恒阻抗和恒电流的复合特性描述。目前针对LED和OLED照明的研究极少。总之,现有研究主要集中于传统白炽灯和荧光灯的单体负荷模型,未考虑各种照明负荷同时接入电网的实际情况,未研究各类照明负荷的综合模型以及全体照明负荷的综合模型。

本文针对热辐射、气体放电、LED光源技术,建立了3种光源技术的单体照明负荷模型及综合照明负荷模型,并给出模型的参数范围;其次,基于各类照明负荷在目前市场中的占比,建立了面向电力系统分析的照明负荷综合模型;最后,通过数值仿真,分析了各参数对所提照明负荷模型的影响,以及模型在暂态过程中的特性。

## 1 照明电器的分类及发展现状

### 1.1 照明电器的分类

热辐射照明、气体放电照明、LED照明、OLED照明分别以白炽灯、荧光灯、LED灯、OLED显示屏为典型代表,如表1所示。

收稿日期:2023-12-05;修回日期:2024-07-17

在线出版日期:2024-12-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51837004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51837004)

表1 各类光源技术及其对应的典型照明电器  
Table 1 Various light source technologies and their corresponding typical lighting appliances

光源类型	典型照明电器	典型照明电器图	特点
热辐射	白炽灯、卤钨灯		灯丝热辐射发光； 发光效率低
气体放电	荧光灯、钠灯、霓虹灯		气体放电发光； 发光效率中等
LED	LED灯		LED发光； 发光效率高
OLED	OLED显示屏		有机薄膜发光； 可实现曲面发光

## 1.2 典型照明电器的应用现状

白炽灯由于具有通用性好、显色性好、成本低等优点,曾广泛用于各类场所,2014年我国白炽灯的市场占比仍高达40%。然而根据《中国逐步淘汰白炽灯路线图》<sup>[12]</sup>,我国从2016年10月1日起,禁止进口和销售15W及以上的白炽灯,这意味着我国的照明电器向其他类型照明电器转型。目前,白炽灯一般运用于成本较低场合和视听照明领域,如高功率投影灯等。考虑到当前的照明电器中仍有部分白炽灯,且其额定功率可能较大,因此在照明负荷建模中,仍需计其影响。

荧光灯由于具有光效高、光色可选、热辐射小、寿命长等特点,近二十年来发展很快,广泛用于各类场所。特别地,光效高、亮度大、管径小的T5、T8直管荧光灯是我国实施绿色照明而推广的高效节能产品,已广泛用于工、商、民及办公场所。

LED灯在发展初期,并无光效和价格优势,故通常应用于信号显示及小功率装饰领域。随着LED技术的发展,百瓦级大功率白光LED灯的光效不断提高,成本不断下降,已进入通用照明领域,部分替代了白炽灯、荧光灯等传统照明电器。

OLED技术近年来发展迅速,主要用于制作手机和电脑屏幕的显示屏,具有可制成弯曲发光面板的优势。但目前OLED技术仍处于初期,在照明电器中的占比很小,故本文不对其单独建模。

## 1.3 照明电器的市场现状

在照明电器市场中,LED灯近年来发展迅猛。附录A图A1显示了2012—2022年中国LED照明行业产值及产品渗透率<sup>[13]</sup>。由图可见,我国LED照明电器的市场渗透率从2012年的3%上升到2022年的85%,其产值规模亦不断增加。

2016—2022年各类照明电器的出口数量占比<sup>[14-16]</sup>如附录A图A2所示。由图可见,LED灯在2016年以后已成为主流出口照明电器,其2022年的占比高达78%。总之,照明电器市场现状表明,LED照明负荷已成为国内外当代照明负荷的重要成分。

## 2 热辐射照明负荷的单体及其综合模型

### 2.1 热辐射照明负荷的工作原理

热辐射照明负荷通过电能加热灯丝使其达到白炽状态,以产生可见光辐射而发光。典型的热辐射照明电器为白炽灯和卤钨灯。

白炽灯的灯丝通常采用熔点和机械强度高的金属钨,发光温度达2700℃,光效约为10lm/W。白炽灯的灯丝在长期高温中,会有少量的钨蒸发,蒸发的钨沉淀在泡壳上,会使其发黑,降低光效。

卤钨灯可视为改进的白炽灯,灯泡内填充了含有部分卤族元素或卤化物的气体,能使蒸发的钨通过卤钨反应重新回到钨丝上,从而能够在3000℃下正常工作。相较于白炽灯,卤钨灯的光效可达20lm/W,且提高了灯泡的功率及寿命。

白炽灯与卤钨灯的工作原理类似,负荷模型基本相同。以下通过典型的白炽灯,分析热辐射照明负荷的单体负荷模型和综合负荷模型。

### 2.2 热辐射照明负荷的单体负荷模型

白炽灯的钨丝具有正电阻特性,其电阻率随着温度的升高而升高。当电压发生变化时,白炽灯的温度将发生改变,进而电阻也将改变<sup>[17]</sup>,因此其负荷模型不能简单地认为是恒阻抗模型。

以下采用ZIP负荷模型描述白炽灯功率和电压的关系。白炽灯灯丝为纯电阻,功率因数为1,故无功功率恒定为0,有功功率的单体负荷模型为:

$$P^j = P_0^j \left[ p_z^j \frac{(U^j)^2}{(U_0^j)^2} + p_i^j \frac{U^j}{U_0^j} + p_p^j \right] \quad (1)$$

式中: $P^j$ 和 $P_0^j$ ( $j=1,2,\dots,n$ )分别为第 $j$ 个单体负荷模型的实际功率和额定功率, $n$ 为考虑建立综合负荷模型时,单体负荷的总数; $U^j$ 和 $U_0^j$ 分别为第 $j$ 个单体负荷的实际电压和额定电压; $p_z^j$ 、 $p_i^j$ 、 $p_p^j$ 为第 $j$ 个单体负荷模型的参数,满足 $p_z^j + p_i^j + p_p^j = 1$ , $p_z^j$ 、 $p_i^j$ 、 $p_p^j$ 分别为实际电压 $U^j = U_0^j$ 时恒阻抗、恒电流、恒功率成分的负荷在 $P_0^j$ 中的占比。

文献[18]针对额定电压为220V、额定功率为60W的某白炽灯泡,实测了不同电压下的灯泡功率,结果如图1所示,图中 $U_*^j$ 为单体负荷电压标幺值, $U_*^j = U^j / U_0^j$ 。对图1所示的实测数据拟合可得到式(1)中的模型参数 $p_z^j = 0.47$ , $p_i^j = 0.57$ , $p_p^j = -0.04$ 。显然,相较于 $p_z^j$ 和 $p_i^j$ , $p_p^j$ 可忽略不计,因此该白炽灯的负荷特性可近似描述为恒阻抗和恒电流的复合负荷特性。此外,文献[11]直接采用ZI负荷模型来拟合白炽灯有功功率特性,结果为 $p_z^j = 0.6$ , $p_i^j = 0.4$ 。

综上,考虑到白炽灯和其他热辐射照明负荷的工作原理类似,故可认为热辐射照明有功功率的单体静态负荷模型可由如下所示的ZI模型描述:

$$P^j = P_0^j [ p_z^j (U_*^j)^2 + p_i^j (U_*^j) ] \quad (2)$$

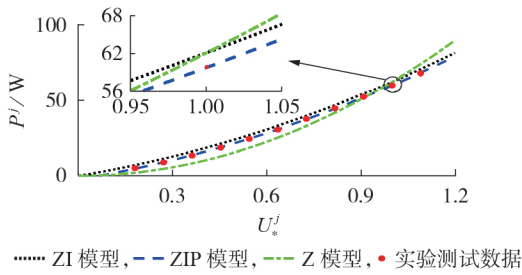


图 1 白炽灯模型与实测数据对比

Fig.1 Comparison between incandescent lamp model and measured data

结合不同文献得,  $p_z^j$  分布区间为 0.3~0.7。

文献[10]针对额定功率为 40 W 的白炽灯,研究了电压骤变下的白炽灯动态特性。结果表明,电压从额定 220 V 暂降至 180 V 时,温度将从额定 2600 K 降至约 2432 K,所需的时间小于 0.1 ms。显然,相对于电力系统暂态过程的时间尺度,0.1 ms 可忽略不计。考虑到各热辐射照明负荷的工作原理类似,可认为热辐射照明的单体负荷功率随电压瞬时变化,能用静态负荷模型近似描述动态特性。

### 2.3 热辐射照明负荷的综合负荷模型

考虑一个热辐射照明综合负荷,设其由  $n$  个参数各异的单体负荷构成。其中,综合负荷的变量和参数为  $U, U_0, P, P_0$  和  $p_z, p_i$ , 其中  $U, U_0, P, P_0$  分别为综合模型的实际电压、额定电压、实际功率、额定功率,  $p_i = 1 - p_z$ ; 单体负荷的变量和参数为  $U^j, U_0^j, P^j, P_0^j$  和  $p_z^j, p_i^j$ , 其中  $p_i^j = 1 - p_z^j$ 。在给定综合负荷电压  $U_*$  ( $U_* = U/U_0$  为标么值)下,单体负荷电压  $U_*^j = k_j U_*$ 。在负荷电压  $U_*$  附近的小范围内,其中  $k_j$  为电压波动系数。显然,综合负荷的实际功率  $P$  应等于  $n$  个单体负荷实际功率  $P^j$  的和,结合式(2)可得:

$$P_0(p_z U_*^2 + p_i U_*) = \sum_{j=1}^n P_0^j [p_z^j (U_*^j)^2 + p_i^j U_*^j] = \sum_{j=1}^n (P_0^j p_z^j k_j^2) U_*^2 + \sum_{j=1}^n (P_0^j p_i^j k_j) U_* \quad (3)$$

由此可得如下关于  $P_0, p_z, p_i$  的 2 个方程:

$$\begin{cases} P_0 p_z = \sum_{j=1}^n P_0^j p_z^j k_j^2 \\ P_0 p_i = \sum_{j=1}^n P_0^j p_i^j k_j \end{cases} \quad (4)$$

由  $p_z + p_i = 1$ , 可解得:

$$\begin{cases} P_0 = \sum_{j=1}^n P_0^j (p_z^j k_j^2 + p_i^j k_j) \\ p_z = \sum_{j=1}^n \frac{P_0^j}{P_0} p_z^j k_j^2 \\ p_i = \sum_{j=1}^n \frac{P_0^j}{P_0} p_i^j k_j \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可见,综合负荷的  $P_0$  由  $n$  个单体负荷的参数决定,其参数  $p_z$  和  $p_i$  由  $n$  个单体负荷模型参数及  $k_j$  决定。

但对实际电力系统中的综合照明负荷,其所包含的单体照明负荷数量及模型参数都难以确知,因此无法用式(5)求出综合模型的参数。为此,假设单体照明负荷的  $P_0^j, p_z^j, k_j$  各自满足某种概率分布,且各相互独立。由于各单体负荷随机,故综合负荷的  $P_0, p_z$  亦随机,此处仍假设它们各自满足某种概率分布,且相互独立。根据上述假设,由式(5)可推导得式(6),具体推导过程见附录 B 式(B1)~(B3)。

$$\begin{cases} E(P_0) = nE(P_0^j) [E(p_z^j) + E(p_i^j)] = nE(P_0^j) \\ E(p_z) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_z^j) = E(p_z^j) \\ E(p_i) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_i^j) = E(p_i^j) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E(\cdot)$  为期望值。

式(6)表明,综合模型  $p_z, p_i$  的期望分别等于单体模型  $p_z^j, p_i^j$  的期望。对于综合模型的  $P_0$ , 考虑到实际系统中的单体负荷总数  $n$  难以确知,而正常条件下负荷电压在额定值附近,故在实际应用中可认为  $P_0$  等于量测得的实际功率  $P$ 。

为了通过仿真计算验证上述推导的准确性,假设建模节点满足附录 B 约束 B1 要求进行仿真。

将综合负荷模型参数估计值与节点仿真值进行对比,结果如附录 B 表 B1 所示,由表可见,推导得出的综合模型参数估计值与仿真值最大相对误差均小于 0.5%,验证了相关理论推导的准确性。

## 3 气体放电照明负荷的单体及其综合模型

### 3.1 气体放电照明负荷的工作原理

气体放电照明负荷通过对气体施加电压使气体放电发光。典型的照明电器为荧光灯、钠灯、霓虹灯等。

荧光灯灯管内充满了低气压汞蒸气与惰性气体,工作时其两端电极施加电压使管内气体放电并释放紫外线,进而通过涂在灯管上的荧光粉发光。

钠灯灯管内的气体为金属钠与惰性气体,根据其蒸汽压可分为低压钠灯与高压钠灯。低压钠灯的工作蒸汽压不超过几个帕,其单色性强、显色性差、放电管长,不宜作为室内照明光源。高压钠灯的工作蒸汽压高达百帕,具有发光效率高、耗电少、寿命长等优点,被广泛运用于场所照明。

霓虹灯灯管内可使用各种低气压气体,且填充不同气体通电后会发出不同颜色的光,例如氢(红色)、氦(粉红色)、二氧化碳(白色)等。

从负荷模型角度看,当气体放电照明负荷的电



压降低至熄灭点电压以下时,照明负荷将会熄灭,存在熄灭点。荧光灯、钠灯和霓虹灯的工作原理类似,负荷模型基本相同。以下通过典型的电子镇流器式荧光灯,分析气体放电照明负荷的单体负荷模型和综合负荷模型。

### 3.2 气体放电照明负荷的单体负荷模型

文献[19]针对不同额定功率荧光灯,实测了不同电压下的灯泡功率与电流,发现在熄灭点电压以上时,荧光灯电压与功率呈线性关系,电流与功率大致呈二次非线性关系,如附录B式(B4)所示。

故可采用IP负荷模型描述其功率-电压关系:

$$\begin{cases} P^j = \begin{cases} P_0^j(p_i^j U_*^j + p_p^j) & U_*^j \geq U_{a^*}^j \\ 0 & U_*^j < U_{a^*}^j \end{cases} \\ Q^j = \begin{cases} Q_0^j(q_i^j U_*^j + q_p^j) & U_*^j \geq U_{a^*}^j \\ 0 & U_*^j < U_{a^*}^j \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Q^j$ 、 $Q_0^j$ 分别为第 $j$ 个单体负荷实际无功功率、额定无功功率; $q_i^j$ 、 $q_p^j$ 分别为第 $j$ 个单体负荷无功功率的恒电流、恒功率分量,二者之和为1; $U_{a^*}^j$ 为第 $j$ 个单体负荷的熄灭点电压。

文献[20]针对不同额定功率电子镇流器式荧光灯进行了实验测试,忽略实测数据的误差、电器老化等因素,假设额定电压时测得功率为模型额定功率 $P_0^j$ ,并利用最小二乘法拟合得出式(7)中各参数的典型值,如附录B表B2所示。

综上,荧光灯的负荷模型可由式(7)所示的IP模型概括, $U_{a^*}^j$ 分布区间为[0.15, 0.25] p.u.;  $p_i^j$ 分布区间为[1.0, 1.2];  $q_i^j$ 分布区间为[0.9, 1.1]。

### 3.3 气体放电照明负荷的综合负荷模型

考虑一个气体放电照明综合负荷,设其由 $n$ 个参数各异的单体负荷构成,其中,综合负荷的变量和参数为 $P$ 、 $P_0$ 和 $p_z$ 、 $p_i$ 、 $p_p$ ,单体负荷的变量和参数分别为 $P^j$ 、 $P_0^j$ 、 $\bar{U}_{a^*}^j$ 、 $\underline{U}_{a^*}^j$ 、 $U_*^j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ )和 $p_i^j$ 、 $p_p^j$ ,其中 $\bar{U}_{a^*}^j$ 、 $\underline{U}_{a^*}^j$ 分别为 $n$ 个单体负荷中最大、最小熄灭点电压。综合负荷的功率 $P$ 需根据单体负荷电压 $U_*^j$ 与 $\bar{U}_{a^*}^j$ 、 $\underline{U}_{a^*}^j$ 的关系分为以下3种情况讨论。

1)各单体负荷电压 $U_*^j$ 均大于 $\bar{U}_{a^*}^j$ 时,单体负荷均正常工作,可叠加求得综合负荷为IP模型:

$$P_0(p_i U_* + p_p) = \sum_{j=1}^n P_0^j(p_i^j U_*^j + p_p^j) \quad U_*^j > \bar{U}_{a^*}^j \quad (8)$$

与2.3节类似,可推导得 $P_0$ 、 $p_i$ 、 $p_p$ 的期望为:

$$\begin{cases} E(P_0) = nE(P_0^j) \\ E(p_i) = E(p_i^j) \\ E(p_p) = E(p_p^j) \end{cases} \quad (9)$$

2)各单体负荷电压 $U_*^j$ 均小于 $\underline{U}_{a^*}^j$ 时,所有照明负荷均熄灭,综合模型功率跌落至0。

3)各单体负荷电压 $U_*^j$ 介于 $\underline{U}_{a^*}^j$ 与 $\bar{U}_{a^*}^j$ 之间时,部分照明负荷将会熄灭,假设各照明负荷 $U_*^j$ 均匀分布,概率分析得,每个照明负荷熄灭的概率为 $(U_*^j - \underline{U}_{a^*}^j) / (\bar{U}_{a^*}^j - \underline{U}_{a^*}^j)$ ,叠加求得综合负荷为ZIP模型:

$$P_0(p_z U_*^2 + p_i U_* + p_p) = \sum_{j=1}^n P_0^j(p_i^j U_* + p_p^j) \left( \frac{U_*^j - \underline{U}_{a^*}^j}{\bar{U}_{a^*}^j - \underline{U}_{a^*}^j} \right) \quad U_*^j \in [\underline{U}_{a^*}^j, \bar{U}_{a^*}^j] \quad (10)$$

为了通过仿真计算验证上述推导的准确性,假设建模节点满足附录C约束C1所示要求进行仿真。通过采样仿真计算,可得如图2所示的均匀分布假设下综合负荷的功率-电压特性,图中 $P_* = P/P_0$ 为标幺值。显然,该特性为分段函数,通过分段拟合,可得综合负荷模型参数。当 $U_* > 0.25$  p.u.时, $p_i = 1.1006$ ,与参数理论均值1.1差异较小,符合理论预期。当 $U_* < 0.15$  p.u.时,功率为0。当 $0.15$  p.u.  $\leq U_* \leq 0.25$  p.u.时, $p_z = 1.2953$ , $p_i = 0.3132$ , $p_p = 0.0178$ 。此外,图2亦表明,高斯分布假设下的综合负荷功率-电压特性与均匀分布假设下的类似,故其参数大致同前。

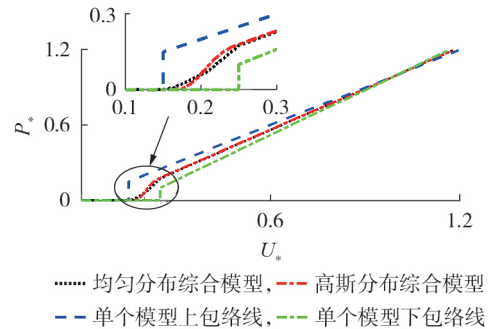


图2 气体放电照明综合负荷的功率-电压特性

Fig.2 Power-voltage characteristics of gas discharge lighting comprehensive load

## 4 LED照明负荷的单体及其综合模型

### 4.1 LED照明负荷的工作原理

LED照明负荷通过LED照明,典型照明电器为LED灯。LED灯由集合了电源与许多电致发光半导体芯片的灯珠组成,单颗LED灯珠功率一般为0.06 W,一米长的LED灯带含有50—80个LED灯珠。

对LED照明负荷建模时,由于半导体器件的导通及保护特性,需要考虑其截止电压的影响,当负荷电压超过或低于规定的截止电压范围时,照明负荷将会熄灭。下面以LED灯为例,探究LED照明负荷的单体负荷模型及其综合模型。

### 4.2 LED照明负荷的单体负荷模型

为探究LED灯的静态特性,分别在不同电压下实测LED灯有功功率和无功功率的变化情况,并绘制LED灯静态功率随电压变化的曲线,如附录C图

C1所示。可见,随着电压的增加,LED灯的有功功率和无功功率随电压增大起伏变化,总体波动幅度小于5%,可近似视为恒功率。因此,可采用以下恒功率模型描述LED静态负荷模型:

$$P^j = \begin{cases} P_0^j & V_{\text{low}}^j \leq U_*^j \leq V_{\text{high}}^j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

$$Q^j = \begin{cases} Q_0^j & V_{\text{low}}^j \leq U_*^j \leq V_{\text{high}}^j \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $V_{\text{high}}^j$ 、 $V_{\text{low}}^j$ 分别为第 $j$ 个LED单体负荷规定的高、低截止电压。常见的低、高截止电压参数 $V_{\text{low}}^j$ 、 $V_{\text{high}}^j$ 取值为:85、265 V,100、265 V,200、240 V等<sup>[21]</sup>。

为研究LED灯的动态特性,通过实测不同程度及不同时间电压跌落下LED灯有功、无功功率的变化过程,可绘制LED灯动态特性图。以持续0.5 s的72%电压跌落情况为例,其动态特性图如附录C图C2所示。在1.6 s时系统电压跌落至约72%,LED灯有功功率会产生幅度约50%的功率跌落,然后迅速恢复至额定功率附近,并保持稳定运行;在2.1 s时系统电压恢复,LED灯有功功率会产生幅度约50%的功率冲击,然后迅速恢复至额定功率附近,并保持稳定运行。上述结果与文献<sup>[22]</sup>可相互验证。

综上,若LED灯电压发生骤变时的输入电压仍在截止电压范围内,则LED灯功率将会产生跌落与冲击,但该过程极为短暂,故可近似认为此时LED灯仍工作于恒功率状态,从而可认为LED灯的动态负荷模型可用静态负荷模型描述。

### 4.3 发光二极管照明负荷的综合负荷模型

考虑一个LED综合负荷,设其由 $n$ 个参数各异的单体负荷构成,其中,综合负荷的变量为 $P$ ,单体负荷的变量和参数分别为 $P^j$ 和 $V_{\text{low}}^j$ 、 $V_{\text{high}}^j$ 。显然,由于单体LED负荷的恒功率特性,故各灯电压均在截止电压范围时,综合负荷的功率 $P$ 应等于 $n$ 个单体负荷功率 $P^j$ 的和,即:

$$P = \sum_{j=1}^n P^j \quad V_{\text{low}}^j \leq U_* \leq V_{\text{high}}^j \quad (12)$$

通过仿真,分析电压大范围变化时的LED综合负荷特性。记 $R_{lv}$ 为仿真中单体负荷 $V_{\text{low}}^j$ 参数在低均值区域的占比,假设建模节点满足附录D约束D1所示要求。附录D图D1显示了上述约束下 $R_{lv}=30\%$ 时 $V_{\text{high}}^j$ 、 $V_{\text{low}}^j$  10000次采样的频次统计结果。

叠加各单体模型可得LED综合负荷的功率-电压特性如图3所示。可见,该特性为分段函数,存在2个功率稳定区域②、④,3个功率转换区域①、③、⑤。功率稳定区域④中所有LED灯均稳定工作,而②中仅有占比为 $R_{lv}$ 的LED灯正常工作。功率转换区域①、③中,随着电压上升,部分LED灯进入截止电压范围开始工作,而区域⑤中,随着电压上升,部

分LED灯超过截止电压范围停止工作。

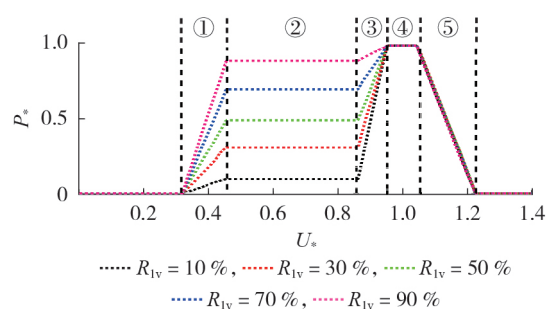


图3 均匀分布假设下LED综合负荷的功率-电压特性  
Fig.3 Power-voltage characteristics of LED comprehensive load under the assumption of uniform distribution

高斯分布假设下的LED综合负荷的功率-电压特性如附录D图D2所示,其中同样具有 $n=10000$ 个LED负荷,但 $V_{\text{low}}^j$ 满足双峰高斯分布,且在2个高斯分布区间的均值分别为85 V和200 V,方差均为5;而 $V_{\text{high}}^j$ 满足高斯分布,且均值为250 V,方差为5。由图可见,高斯分布假设下的LED综合负荷特性与均匀分布假设下的特性大致相同,虽然功率转换较为平滑,但仍具有相似的功率转换特性。

综上,功率转换区域①、③、⑤中综合负荷模型由接入的LED截止电压的概率分布决定,功率稳定区域②、④中综合负荷模型表现为恒功率,LED照明负荷综合模型如附录D式(D1)所示。

## 5 照明负荷的综合模型及仿真分析

### 5.1 照明负荷的综合模型

照明负荷的综合模型由各类照明负荷综合模型按功率占比聚合而成<sup>[23]</sup>,因此需要分析以上3种照明负荷在电力系统中的功率占比情况。

虽然目前LED照明负荷已成为市场主流,2022年其国内市场渗透率已高达85%,出口数量占比亦高达78%,但考虑到目前仍存在较多热辐射照明负荷以及气体放电照明负荷,且LED照明能效相较于热辐射照明负荷和气体放电照明负荷更高,因此,实际LED照明负荷的功率占比应适当减小。

图4显示了LED的参数 $R_{lv}$ 为30%时,4组不同照明功率占比下综合照明负荷的电压和功率特性。其中热辐射、气体放电和LED照明负荷综合模型及其参数分别如2.3、3.3、4.3节所述。为度量不同特性曲线之间的差异,定义曲线 $L_a$ 相对曲线 $L_b$ 的平均偏差 $D_E$ 与最大偏差 $D_M$ 如式(13)所示。

$$\begin{cases} D_E = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left| \frac{y_a^k - y_b^k}{y_b^k} \right| \\ D_M = \max \left( \left| \frac{y_a^k - y_b^k}{y_b^k} \right| \right) \end{cases} \quad (13)$$

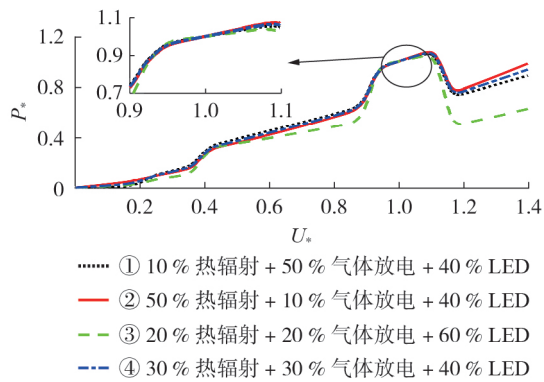


图4 不同功率占比假设下照明负荷综合模型

Fig.4 Comprehensive model of lighting load under different power ratio assumptions

式中： $m$ 为曲线采样点数； $y_a^k$ 、 $y_b^k$ 分别为曲线 $a$ 、 $b$ 的第 $k$ 个采样值。

分析并比较图4中的不同特性曲线，结论如下。

1)第①、②、④条特性曲线，即LED照明负荷功率占比相同、但热辐射照明负荷占比不同的3条曲线，在负荷电压 $0 < U_* < 1.2$  p.u.范围内相对其平均值曲线偏差较小，平均偏差仅为2.74%，因此可认为LED照明负荷功率占比40%而其他负荷功率占比不定时的负荷特性大致相同，其原因在于热辐射与气体放电照明负荷具有相似的功率-电压特性。

2)第③条与其他3条特性曲线，即LED照明负荷功率占比60%与40%时，在负荷电压 $0 \leq U_* \leq 1.1$  p.u.时，各曲线大致相同，4条曲线相对其平均值曲线的平均偏差为4.68%；而在负荷电压 $1.1 \text{ p.u.} < U_* < 1.2$  p.u.时4条曲线差距较大，平均偏差为16.37%。由于电力系统分析时一般很少出现 $U_* > 1.1$  p.u.的情况，因此可认为LED照明负荷功率占比60%与40%时的负荷特性大致相同。

结合以上2点，以下算例仅针对热辐射、气体放电、LED照明负荷功率占比分别为30%、30%、40%情况展开。

实际市场中LED低截止电压参数 $V_{low}$ 仅少数设计在低电压区域，因此以下针对 $R_{lv}$ 分布在25%~35%范围内照明负荷综合模型进行分析。图5显示

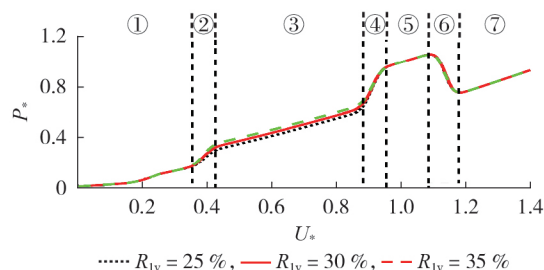


图5 LED不同 $R_{lv}$ 值下照明负荷综合模型

Fig.5 Comprehensive model of lighting load under different LED  $R_{lv}$  values

了上述功率占比下，LED不同 $R_{lv}$ 值下的综合照明负荷的电压和功率特性曲线。

由图5可得如下结论。

1)当输入电压在区域①、③、⑤、⑦时，LED照明功率恒定，故总照明功率随电压变化的特性由热辐射照明负荷与气体放电照明负荷主导，综合负荷模型可用ZIP模型描述。

2)当输入电压在区域②、④、⑥时，总照明功率-电压的特性由LED照明负荷主导。其中，随着电压增大，区域②、④中部分LED开始工作，总照明功率较快增大，而区域⑥中部分LED停止工作，总照明功率快速下降。

3)对3条特性曲线，计算各曲线与平均值曲线的相对偏差，可知负荷电压 $0 < U_* < 1.2$  p.u.时各曲线偏差较小，平均偏差为2.55%。因此，可认为参数 $R_{lv}$ 在25%~35%范围内变化时，照明负荷综合模型的负荷特性大致相同。

结合以上分析，以下算例仅针对LED灯 $R_{lv}$ 值为30%，且热辐射、气体放电、LED照明负荷功率占比分别为30%、30%、40%典型情况展开。

## 5.2 基于BPA的实用近似照明负荷综合模型

由于图5所示的照明负荷综合模型特性表现为折线，难以应用于BPA等电力系统商业仿真软件中。为此，将图5中参数 $R_{lv}$ 为30%的功率-电压曲线分别进行100点均匀采样，并采用过定点(1,1)二次拟合，可得BPA程序可用的实用近似负荷模型。

综合负荷模型曲线与实用计算负荷模型的特性差异如附录D图D3所示，其中实用模型曲线参数分别为 $p_z=0.84$ 、 $p_i=0.09$ 、 $p_p=0.07$ ，其负荷电压 $U_*$ 在0~1.2 p.u.内与对应综合模型平均偏差为22.3%，且在0~0.4 p.u.内能较好地描述综合模型，在0.4~0.6 p.u.、0.9~1 p.u.内其功率较综合模型偏小，在0.4~0.9 p.u.内功率较综合模型偏大。拟合出的实用负荷模型曲线与综合模型存在一定偏差，因此下文针对其在故障电压下的功率响应曲线进行进一步仿真，以分析实用模型的准确性。

## 5.3 照明负荷综合模型的仿真分析

为探究所建照明负荷电网综合模型及模型各参数对系统暂态分析的影响，对LED灯的 $R_{lv}$ 值为30%下照明负荷综合模型、实用模型以及某省网推荐的静态负荷典型ZIP模型( $p_z=0.53$ 、 $p_i=0.34$ 、 $p_p=0.13$ )进行仿真，观察其功率对暂态电压动态的响应情况。

$R_{lv}=30\%$ 时照明负荷综合模型、照明负荷实用模型及某省网的ZIP模型功率响应情况如附录D图D4所示，其中黑色曲线对应于某实际故障下的电压录波曲线，最低电压约0.90 p.u.，故障时长约0.1 s，此仿真对应一般情况下的电力系统故障情况。可见，典型ZIP模型的功率响应跌落最不严重，实用模



其次之,综合模型给出的实际功率响应跌落最严重。

计算可得,在时间0.05~0.15 s内,综合模型与实用模型功率响应曲线平均偏差为5.20%,综合模型与典型ZIP模型功率响应曲线平均偏差为6.60%。说明电压跌落至0.90 p.u.时各模型响应差距较小,但实用模型误差较典型ZIP模型更小,故在此情况下实用模型精度较典型ZIP模型有一定提高。

以上模型在最低电压0.78 p.u.、时长约0.1 s故障电压下的功率响应情况如附录D图D5所示,此仿真对应更加恶劣的电力系统故障情况。可以看出,电压跌落加深时,各模型功率跌落更深,且实用模型的实际功率响应跌落仍比典型ZIP模型严重。一般来说,在受端系统中,负荷在跌落电压影响下,功率跌落越低,对系统运行越有利。因此实用模型相较于典型ZIP模型能减少电网运行保守性,更大化挖掘电网运行潜力,有效缓解配电网的扩容压力<sup>[24]</sup>。

计算可得,在时间0.05~0.15 s内,综合模型与实用模型功率响应曲线平均偏差为26.04%,综合模型与典型ZIP模型功率响应曲线平均偏差为34.58%。说明电压跌落至0.78 p.u.时各模型响应差距较大,但实用模型误差仍比典型ZIP模型小,说明在不同程度的电力系统故障情况下实用模型较典型ZIP模型在精度方面都有一定提高,故采用实用模型能够提高电力系统暂态分析的准确性。

图6显示了不同程度电压跌落下实用模型以及典型ZIP模型分别与综合模型曲线的平均误差,图中最低故障电压为标幺值。可以看出,模型误差在电压跌落至0.4~0.5 p.u.与0.9~1.0 p.u.内时较小,且实用模型误差始终小于典型ZIP模型,说明本文提出的实用模型具有其实用意义。

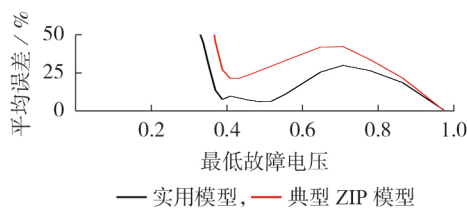


图6 不同电压跌落下各模型平均误差

Fig.6 Average error of each model under different voltage drop

## 6 结论

本文针对热辐射照明、气体放电照明、LED照明3类主流照明负荷,根据其工作原理和性能,阐述各类照明负荷的动态特性可由静态模型近似描述;建立了各类照明负荷的单体负荷模型,并根据其参数的分布范围,建立了各类照明的综合负荷模型;最后,根据照明负荷市场占比,建立了照明负荷综合模型,并通过拟合,获得了适用于BPA软件的实用近

似照明负荷综合模型。

仿真分析表明热辐射、气体放电和LED照明负荷功率占比与LED照明负荷截止电压低均值占比 $R_{lv}$ 在小范围内波动时,综合照明负荷模型近似相同,且热辐射、气体放电、LED这三类照明负荷功率的占比分别为30%、30%、40%,LED参数 $R_{lv}$ 为30%时为典型情况。针对上述典型情况,综合照明负荷的功率响应可由实用近似照明负荷综合模型较好地近似,且其平均误差相较某省网推荐的静态负荷典型ZIP模型更小。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 屈星,李欣然,宋军英,等.考虑配电网调压的综合负荷模型[J].电工技术学报,2018,33(4):759-770.  
QU Xing, LI Xinran, SONG Junying, et al. Composite load model considering voltage regulation of distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4):759-770.
- [2] 温其东.从2022中国照明整体情况看,未来照明企业应重点关注什么[EB/OL].(2023-01-31)[2023-12-15].<https://www.lightingchina.com.cn/News/108196.html>.
- [3] 庞传军,余建明,冯长有等.基于LSTM自动编码器的电力负荷聚类建模及特性分析[J].电力系统自动化,2020,44(23):57-63.  
PANG Chuanjun, YU Jianming, FENG Changyou, et al. Clustering modeling and characteristic analysis of power load based on long-short-term memory auto-encoder[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23):57-63.
- [4] 李亚楼,张星,胡善华,等.含高比例电力电子装备电力系统安全稳定分析建模仿真技术[J].电力系统自动化,2022,46(10):33-42.  
LI Yalou, ZHANG Xing, HU Shanhu, et al. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10):33-42.
- [5] 康重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学与理论问题研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Modeling and simulation technology for stability analysis of power system with high proportion of power electronics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9):2-11.
- [6] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904, 2205.
- [7] 马进,贺仁睦,周彦军.负荷模型泛化能力的研究[J].中国电机工程学报,2006,31(21):29-35.  
MA Jin, HE Renmu, ZHOU Yanjun. Research on generalization capability of load model [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 31(21):29-35.
- [8] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3):967-979.
- [9] 张东霞,汤涌,朱方,等.基于仿真计算和事故校验的电力负荷模型校核及调整方法研究[J].电网技术,2007,31(4):24-31.  
ZHANG Dongxia, TANG Yong, ZHU Fang, et al. Study on load model validation and its adjustment approach based on cali-

- bration of simulations against disturbances[J]. Power System Technology, 2007, 31(4):24-31.
- [10] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2008:49-52.
- [11] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012:35-37.
- [12] 国家发展改革委. 中国逐步淘汰白炽灯路线图[EB/OL]. (2011-11-14)[2023-12-15]. [https://www.gov.cn/zw/gk/2011-11/14/content\\_1992476.htm](https://www.gov.cn/zw/gk/2011-11/14/content_1992476.htm).
- [13] 彭志伟. 2021年中国LED芯片现状及趋势分析, 产值大幅度回升, 龙头分别布局 Mini/Micro[EB/OL]. (2022-05-25)[2023-12-15]. <http://www.huaon.com/channel/trend/807337.html>.
- [14] 温其东. 2021年中国照明行业出口情况报告[J]. 中国照明电器, 2022(1):1-12.  
WEN Qidong. Export report of China's lighting industry in 2021[J]. China Light & Lighting, 2022(1):1-12.
- [15] 温其东. 2020年中国照明行业出口情况报告[J]. 中国照明电器, 2021(3):1-9.  
WEN Qidong. Export report of China's lighting industry in 2020[J]. China Light & Lighting, 2021(3):1-9.
- [16] 温其东. 2019年中国照明行业运行情况报告(上)[J]. 中国照明电器, 2020(2):1-9.  
WEN Qidong. 2019 China lighting industry operation report (I)[J]. China Light & Lighting, 2020(2):1-9.
- [17] 张慧芬, 张恩平. 直流发生器输出电流自适应调节方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12):145-149.  
ZHANG Huifen, ZHANG Enping. Adaptive output current adjustment of direct current generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):145-149.
- [18] 江铁臣. 白炽灯电阻与电压的关系[J]. 沈阳化工学院学报, 1992, 6(2):159-164.  
JIANG Tiechen. The relationship between the voltage and the resistance of bulb filament[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 1992, 6(2):159-164.
- [19] MOO C S, CHUANG Y C, HUANG Y H, et al. Modeling of fluorescent lamps for dimmable electronic ballasts[C]//IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. San Diego, USA: IEEE, 2002:2231-2236.
- [20] 刘遵义, 郜洪亮, 余晓鹏, 等. 照明用电设备的负荷建模研究[J]. 河南电力, 2005, 33(4):1-6.  
LIU Zunyi, GAO Hongliang, YU Xiaopeng, et al. Research on load modeling of lighting electrical equipment[J]. Henan Electric Power, 2005, 33(4):1-6.
- [21] 方志烈. 半导体照明技术: 电子工程技术丛书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009:201-307.
- [22] 鞠平, 杨杰, 金宇清, 等. 电力电子接口负荷的动静综合模型[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10):9-14.  
JU Ping, YANG Jie, JIN Yuqing, et al. Composite dynamic-static model of power electronic interfaced loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10):9-14.
- [23] 李欣然, 李培强, 陈辉华, 等. 基于统计综合负荷建模的系统方法研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3):25-28.  
LI Xinran, LI Peiqiang, CHEN Huihua, et al. Systemic method research of aggregate load modeling based on component-based modeling approach[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3):25-28.
- [24] 张勇军, 周星月, 唐渊, 等. 双楼宇专变供电充电站负荷的时空二维调控建模[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(6):37-45.  
ZHANG Yongjun, ZHOU Xingyue, TANG Yuan, et al. Time-space two-dimensional regulation modeling of charging station load powered by bi-building special transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6):37-45.

#### 作者简介:

季尚进(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统负荷特性分析(E-mail: 22310075@zju.edu.cn);

吴浩(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统负荷特性分析及负荷建模、电力系统稳定性分析和控制(E-mail: zjuwuhao@zju.edu.cn)。

(实习编辑 丁欣欣)

## Comprehensive lighting load modeling based on electrical characteristics of typical light sources

JI Shangjin<sup>1</sup>, CHEN Yujie<sup>1</sup>, WU Hao<sup>1</sup>, KONG Jianhong<sup>2</sup>, JIN Yuqing<sup>3</sup>, JU Ping<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Philips Lighting Electronics(Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

3. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In 2022, the proportion of lighting load electricity consumption is up to 12% in China's power system, and lighting appliances based on power electronics technology have become the mainstream of the lighting market. Therefore, there is an urgent need to study the comprehensive model of contemporary lighting load. The comprehensive model for lighting load in the power system has been systematically studied. Aiming at the typical lighting loads of three mainstream light source technologies: thermal radiation, gas discharge and light emitting diodes, the comprehensive model of each type of lighting load based on their respective electrical characteristics is established using the aggregation equivalence method, and the typical parameter range of the model is provided. Based on the market share of various lighting appliances, the comprehensive model of lighting load in the power system is established. A practical approximate model for power system lighting load applicable to BPA software is proposed, and the characteristics of the proposed lighting load model during transient processes are analyzed through numerical simulation, which verifies the practicability and rationality of the model.

**Key words:** load model; lighting load; typical light source; electrical characteristics; numerical simulation



附录 A

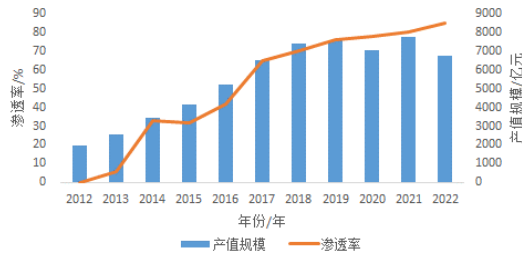


图 A1 2012—2022 年中国 LED 照明行业产值及产品渗透率

Fig.A1 Output value and product penetration rate of China's LED lighting industry from 2012 to 2022

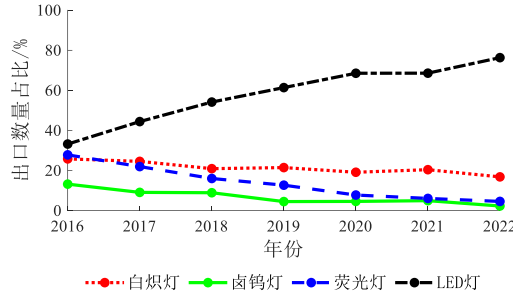


图 A2 2016—2022 年各类照明电器出口数量占比

Fig.A2 Export quantity proportion of lighting appliances from 2016 to 2022

附录 B

采用  $E$  和  $D$  分别表示概率分布的均值和方差，由式(5)可得：

$$\begin{cases} E(P_0) = nE(P_0^j) [E(p_z^j)E(k_j^2) + E(p_i^j)E(k_j)] \\ E(p_z) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_z^j)E(k_j^2) \\ E(p_i) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_i^j)E(k_j) \end{cases} \quad (B1)$$

假设随机变量  $k_j$  的分布均值为  $E(k_j)$ ，方差为  $D(k_j)$ ，则  $E(k_j^2)$  可由下式推导得出：

$$\begin{aligned} E(k_j^2) &= E(k_j^2) - 2E^2(k_j) + E^2(k_j) + E^2(k_j) \\ &= E[k_j^2 - 2k_jE(k_j) + E^2(k_j)] + E^2(k_j) \\ &= E[k_j - E(k_j)]^2 + E^2(k_j) \\ &= D(k_j) + E^2(k_j) \end{aligned} \quad (B2)$$

电网 220V 供电负荷电压偏差要求控制在标称电压  $\pm 7\%$  内，假设随机变量  $k_j$  满足高斯分布，其分布均值  $E(k_j) = 1$ ，若 99.7% 的负荷电压满足上述要求，即  $k_j$  分布在  $-3$ — $3$  个标准偏差内，则  $D(k_j) = (0.07/3)^2 \approx 5.4 \times 10^{-4}$ ， $D(k_j)$  相较于  $E(k_j)$  可忽略不计，由式(7)可得  $E(k_j^2) = 1$ ，结合式(6)可进一步推导出：

$$\begin{cases} E(P_0) = nE(P_0^j) [E(p_z^j) + E(p_i^j)] = nE(P_0^j) \\ E(p_z) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_z^j) = E(p_z^j) \\ E(p_i) = nE\left(\frac{P_0^j}{P_0}\right) E(p_i^j) = E(p_i^j) \end{cases} \quad (B3)$$

约束 B1: 假设建模节点具有  $n=10\ 000$  个热辐射照明负荷, 其单体负荷参数  $p_0^j$  满足区间 $[10,110]$ 上均匀分布或者均值为 60 W、方差为 15 的高斯分布, 恒阻抗分量  $p_z^j$  满足区间 $[0.3,0.7]$ 上均匀分布或均值为 0.5、方差为 0.1 的高斯分布, 节点中各单体负荷电压参数  $k_j$  满足均值为 1、方差为  $5.4 \times 10^{-4}$  的高斯分布。

表 B1 仿真算例综合模型参数

Table B1 Comprehensive model parameters for simulation examples

随机变量分布情况	变量	估计值	仿真值	相对误差 $\delta$ /%	最大相对误差 /%
均匀分布	$p_0/n$	59.959	60.006	0.077	
均匀分布	$p_z$	0.500	0.502	0.398	0.402
均匀分布	$p_i$	0.500	0.498	0.402	
高斯分布	$p_0/n$	60.218	60.153	0.108	
高斯分布	$p_z$	0.500	0.499	0.140	0.140
高斯分布	$p_i$	0.500	0.501	0.140	
均匀分布	$p_0/n$	59.741	59.785	0.074	
高斯分布	$p_z$	0.500	0.501	0.140	0.140
高斯分布	$p_i$	0.500	0.499	0.140	
高斯分布	$p_0/n$	60.016	60.013	0.005	
均匀分布	$p_z$	0.500	0.502	0.040	0.040
均匀分布	$p_i$	0.500	0.498	0.040	

$$\begin{cases} U(P) = A_u + B_u P \\ I(P) = A_i + B_i P + C_i P^2 \end{cases} \quad (B4)$$

式中:  $P$ 、 $U$  和  $I$  分别为实际功率、电压和电流;  $A_u$  和  $B_u$  为电压功率模型的参数;  $A_i$ 、 $B_i$  和  $C_i$  为电流功率模型的参数。

表 B2 电子镇流器荧光灯负荷模型参数

Table B2 Load model parameters of electronic ballast fluorescent lamp

额定功率/W	$U_{a*}^j$	$p_i^j$	$p_p^j$	$q_i^j$	$q_q^j$
10	0.23	1.13	-0.13	0.97	0.03
18	0.18	1.10	-0.10	0.93	0.07
40	0.20	1.12	-0.12	1.01	-0.01

### 附录 C

约束 C1: 假设建模节点具有  $n=10\ 000$  个气体放电照明负荷, 其单体负荷额定功率参数  $P_0^j$  满足区间 $[10,50]$  W 上的均匀分布, 参数  $p_i^j$  满足区间 $[1.0,1.2]$ 上的均匀分布或者均值为 1.1、方差为 0.05 的高斯分布, 熄灭点电压  $U_{a*}^j$  满足区间 $[0.15,0.25]$  p.u.上的均匀分布或者均值为 0.2 p.u.、方差为 0.02 的高斯分布, 节点中各单体负荷电压参数  $k_j$  满足均值为 1、方差为  $5.4 \times 10^{-4}$  的高斯分布。

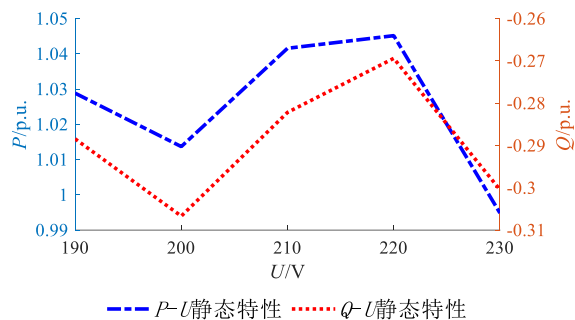


图 C1 LED 灯静态特性实验图

Fig.C1 Experimental diagram of LED lights static characteristic

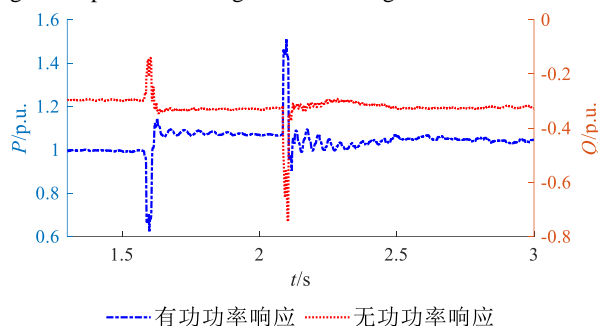


图 C2 70%电压跌落下 LED 负荷的动态特性

Fig.C2 Dynamic characteristics of 70% voltage drop for LED load

### 附录 D

约束 D1: 假设当前建模节点具有  $n=10\ 000$  个 LED 照明负荷。由于 LED 负荷数量众多, 其单体负荷模型参数分布范围较广, 故假设其负荷模型参数中的低截止电压  $V_{low}^j$  满足双均值的均匀分布, 两分布区间分别为 70~100 V 和 190~210 V, 且记  $R_v$  为截止电压低均值的占比, 即  $V_{low}^j$  分布在低均值 70~100 V 区间占比为  $R_v$ , 分布在高均值 190~210 V 区间占比为  $1-R_v$ ; 假设高截止电压  $V_{high}^j$  满足均匀分布, 且分布区间为 230~270 V。

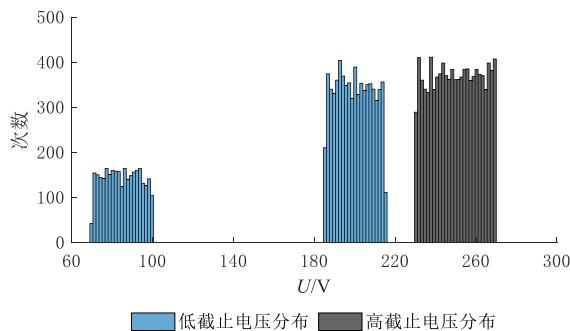


图 D1 高低截止电压分布次数

Fig.D1 Distribution times of high and low cut-off voltage



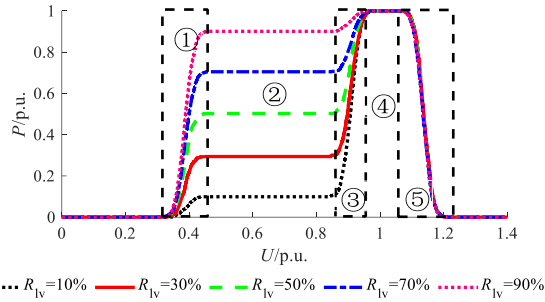


图 D2 高斯分布假设下 LED 综合负荷的功率-电压特性

Fig.D2 Power-voltage characteristics of LED comprehensive load under Gaussian distribution assumption

$$P = \begin{cases} R_{lv} f_{lv} & U_* \in \textcircled{1} \\ R_{lv} & U_* \in \textcircled{2} \\ R_{lv} + (1 - R_{lv}) f_{lv} & U_* \in \textcircled{3} \\ 1 & U_* \in \textcircled{4} \\ 1 - f_{hv} & U_* \in \textcircled{5} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (\text{D1})$$

式中：函数  $f_{lv}$  和  $f_{hv}$  分别表示  $V_{low}$  与  $V_{high}$  概率分布的累积分布函数。

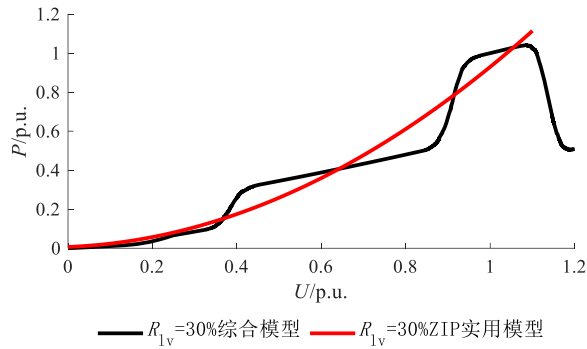


图 D3 典型情况下综合负荷模型和实用负荷模型

Fig. D3 Comprehensive load model and practical load model under typical situation

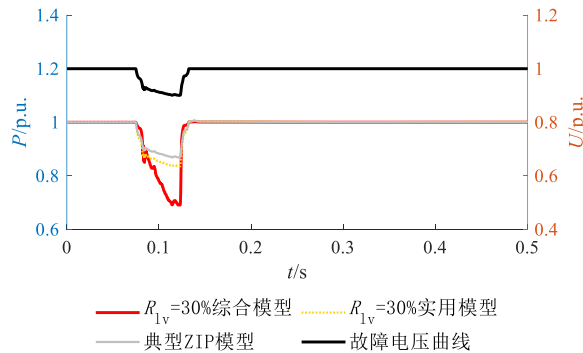


图 D4 电压跌落至 0.90 时综合模型仿真

Fig.D4 Comprehensive model simulation for voltage drop to 0.90

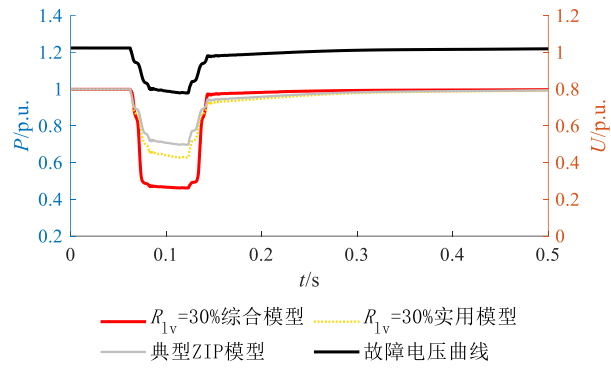


图 D5 电压跌落至 0.78 时综合模型仿真

Fig.D5 Comprehensive model simulation for voltage drop to 0.78