

基于先进电力电子技术新型节能器在城市绿色照明工程中的应用

随着电力电子技术及器件的快速发展,将原设计用于电力工业的电能控制技术运用于绿色照明领域,能更为灵活、准确且高效地实现城市绿色照明建设目标。结合我国某市的绿色照明建设的实际工程背景,提出应用一种新型降压型节能器,以达到深入挖掘城市节能潜力的目的。该节能器基于“交-交”斩波电力电子技术,通过计算机仿真模拟深入分析其工作原理,并结合其城市绿色照明工程中的具体应用,证明其良好的节能效率。

李大兴/国网冀北电力有限公司承德供电公司

罗 玮/国网冀北电力有限公司

0 引言

我国“十一五”规划指出:“要把节约资源作为基本国策,发展循环经济,保护生态环境,坚持节约发展、清洁发展和安全发展,实现可持续发展。”提高能源,特别是电能的使用效率,已成为我国经济可持续发展的一个巨大挑战。根据有关资料显示^[1],我国2005年发电量为24 750亿kW·h,而我国城市照明系统的总耗电量约51亿kW·h,约占我国电能总消耗的0.2%。虽然城市照明系统的占比并非较高,但考虑到我国用电的总能耗基数大,同时城市照明系统的支出通常都由政府财政承担,若是能够有效降低路灯系统的能耗,将会为社会与政府节约一笔极为可观的开支。

本论文的工作围绕我国北方某绿色能源示范城市节能的实际工程背景展开。该市多数线路已更换了节能型灯具,但由于路灯总功率较大,还需进一步挖掘节能潜力。为此,本项目实施中

发现该市的路灯照明系统的运行电压普遍偏高,路灯在夜间特别是在深夜阶段常常需要承受230~240 V的运行电压。国家标准^[2]规定允许的照明配电系统的电压偏差为220 V标称电压的-10%和+7%。在本论文的工程项目中,路灯电压甚至超过国家标准规定的235 V上限。这时较高的电压转化成热量,减损灯具寿命,增加不必要的电能消耗。因此,如果能通过降压、稳压实现路灯节能,既节约了能源也保护了灯具,能够起到良好的节能增效的目标。

传统的降压、稳压节能措施,如安装晶闸管斩波型、自耦变压器以及接触器型降压器,对电网造成了严重的谐波污染,或对路灯保护不够,可能造成降压时路灯熄灭等事故,有着非常明显的缺点^[3]。基于以上目标,本文提出了一种新型基于“交-交”斩波电力电子技术降压型路灯节能器。得益于电力电子器件,特别是IGBT器件的快速发展,该类型节能器能够实现强电流的高频通断控制,从而将原设计用于电力工业的电能控制技术运用于绿色照明领域,能更为灵活、精确且高效地实现城市绿色照明建设目标。本文首先列举了该市已采用的路灯节能措施,之后通过计算机模拟具体分析该类型节能器的工作原理,并说明了该类型节能器相对于传统节能手段的优势,最后结合该市的绿色照明工程建设的现场实测结果,验证了该类型节能器的节能效果。



李大兴/高级工程师

关键词/Keywords

绿色照明·
路灯节能·
电力电子·
交交斩波·

1 工程实施城市现存的路灯节能措施

工程实施城市为我国北方某绿色能源示范城市，该城市路灯系统的总装灯功率逾兆瓦，节电前电费是该市财政支出的一个重要项目。为进一步贯彻国家“节能减排”的号召，实现城市照明系统的科学发展，该市电力管理部门在近几年的工作采用以下手段进行路灯系统的节能，现简介如下。

(1) 全夜/半夜灯隔盏亮节能模式

相关标准详细规定了这一节能措施如下：

“除居住区和少数有特殊要求的道路以外，在深夜宜选择下列措施降低路面亮度，采用双光源灯具，深夜时关闭一只光源。”^[4]该市相关部门根据以上规定，对相关照明线路进行改造，照明系统增加了半夜灯火线，将需要在深夜关闭的光源连接在该火线上。通过计算机远程或本地控制路灯开关，控制半夜灯火线的开断，从而在深夜时段熄灭部分路灯，达到节能的目的。

虽然全夜/半夜灯隔盏亮模式能够有效地节约电能，但由于该模式运行时需要熄灭部分光源，无法从机理上阻止路面“斑马纹”现象的发生。同时，光源熄灭的瞬间，会造成亮度的突然变化，有可能造成在驶司机短暂的视觉障碍，引发事故。因此，在对亮度有较高要求的快速干道上，不能运用全夜/半夜灯等模式进行节能。

(2) 串联电抗器降压节能模式

为了避免“斑马纹”现象的发生，并达到有效节能的目的，该市照明系统还采用了串联电抗器降压的方式进行照明控制。通过计算机远程或本地控制开关，在需要节能时，将电抗器串联入回路。由于电流通过电抗器时，电抗器上会产生压降，这将使加在路灯上的电压降至190 V左右，在下半夜行人、车辆较为稀少的时候，通过增加电抗器降压，可以达到节能的目的。采取这种措施可以避免道路灯光“斑马纹”情况的出现，具有道路平均亮度一致的优势。节能器的切合通过全半夜灯的计算机控制线路同步控制。

虽然串联电抗器节能模式具有稳定性好、亮

度一致的优点，其缺点也是很明显的：

1) 串联电抗器后，照明系统的整体功率因数下降，无功电流比例显著上升，这将导致不必要的线路损耗和变压器损耗，该损耗所占比例约为总能耗的1%~2%。

2) 串联电抗器的降压模式不固定，需要根据每一条线路的容量，重新整定所加电抗器的电抗值，无法批量购买节能器件，从而降低了质量，而且提高整体的购买成本；同时，若线路更换了灯具，电抗器的大小还需要重新整定并购买，非常麻烦。

3) 串联电抗器后，灯具两端的电压依然随着电网的电压波动而波动。在下半夜的时候，电网的电压一般较日间高，维持在230~240 V，而电抗器的电抗值一般是按照220 V的额定电压来整定的，较高电网电压下，节能的效果显著下降。

4) 由于串联电抗器的切合是一个暂态过程，流过电抗的电流不能瞬时变化，从而造成开通瞬间电抗器的压降较大，有可能造成瞬间的低压从而造成部分老化灯具熄灭，导致亮灯率的下降。

基于以上缺点，虽然该市采用了电抗器的降压模式，但是由于其安装较为烦琐，节能效果不确定，在新安装的线路中，该节能模式基本已经没有了使用了。

(3) 基于历史气象数据的节能开灯模式

传统的路灯控制系统常常使用较为粗放的开关灯时间控制方法。事实上，由于太阳与地球的照射角度每天都在发生变化，需要准确地计算当地的日升日落的时间，才能达到理想的节能效果，达到“天黑开灯、天亮关灯”的控制目的，避免“开灯太晚、关灯太早”的投诉。根据有关资料显示，一个电费为3 000万元的城市，每日少开灯1 min，全年可以节约电费5万元。由此可见，制定准确、标准的节能开关时刻表，对于节能有着重要的意义。

但是，若仅仅根据节气与天文计算来定义开关时刻，又会太过死板，因为天气的变化可能会对道路的亮度造成严重的影响。为了达到灵活控制路灯的目的，该市通过安装远程监控单元

(RTU)的方法,使用计算机监视并控制路灯的亮灭。计算机将具体的灯具开断命令下发给输电电台,电台可以通过无线远程联系架设在各个路灯线路的RTU,控制每条线路的具体的开断时间。计算机中预先存储有根据天文数据与实测的结果制定的线路开关时间表,以达到自动开断减少人工错误的目的。当有异常天气、气候情况(例如暴雨、日食等)出现时,可以通过计算机修改开断时刻表,以满足路灯灵活控制的要求。

在采用了相关节能措施之后,该市的照明系统部分线路的能源利用效率得到了较大的提高,然而由于以上所述技术的原理限制,使得该市部分电费较高、耗能较大的路段无法安装节点设备,这主要由快速路段的“斑马纹”现象,以及含装饰用金属卤化物灯路段降压熄灭现象所限制。同时,以上节能技术均无法解决该市夜间电压过高,威胁路灯寿命的问题。这些都给该市绿色照明工程的进一步深入实施设置了障碍。结合该项目背景,本文提出了安装基于“交-交”斩波技术的降压型节能器,以深入挖掘该市路灯系统的节能潜力。

2 基于“交-交”斩波技术的降压型节能器的优势及工作原理

2.1 新型交交斩波降压技术简介

“交流-交流”斩波降压技术的节能原理是通过新型的电力电子开关器件,控制路灯两端的电压的大小,达到降低路灯的功率以节约电能的目的。该技术的节能原理具有明显的技术优势,包括以下几个方面。

1) 采用整体调压技术,避免了全夜/半夜灯隔盏亮的道路“斑马纹”情况的出现,在快速路段也可以使用。

2) 不降低路灯线路的功率因数,避免了串联电抗器降压所增加的无功电流的线路损耗与变压器损耗。

3) 输出电压稳定、可靠。在先进的电力电子与滤波技术的辅助下,“交-交”斩波变压器输

出电压稳定可靠,且不随电网电压波动而波动。

4) 采用先进的控制技术,输出电压可以连续微调。与传统的串联电抗器降压的变压器分接头调整降压节能方式不同的是,“交-交”斩波变压技术的电压输出是连续变化的而不是骤然突变,这就保证了其在有金属卤化物灯的路段亦可以使用,同时由于其节能时电压不突变,部分老化的灯泡亦不会突然熄灭,可以有效提升路灯系统的亮灯率。

5) 与现有的通信技术兼容良好,可以无缝接入现有的路灯监控系统中使用。

2.2 新型“交-交”斩波降压技术的原理

新型“交-交”斩波降压技术的原理示意图如图1所示。

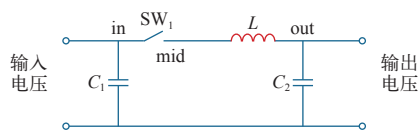


图1 “交-交”斩波降压技术的电路图

在图1中, in点为输入电压接入端(交流220 V、50 Hz), SW_1 为电力电子的开关器件,其开关频率为50 kHz,通过脉冲宽度调节技术(PWM)来控制out点的输出电压,其原理如下。

通过电容 C_1 ,滤去输入端的谐波,并平滑输入电流,从而使得in点的电压满足为标准的50 Hz正弦波,如图2所示。

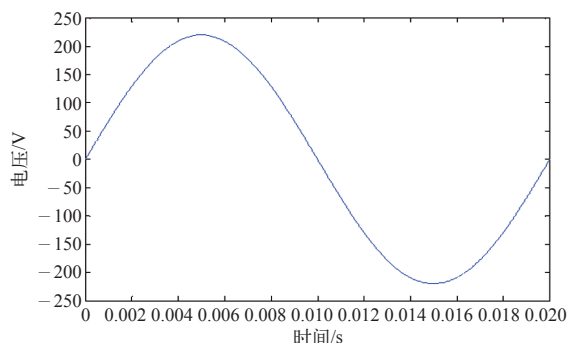


图2 输入电压波形

通过开关 SW_1 ,控制mid点的电压输出,其控制逻辑如下,以控制电压输出为输入电压的90%为例:①在一个开关周期内,前90%的时间,开关

SW₁闭合，mid点电压与输入电压相同；②在一个开关周期内，后10%的时间，开关SW₁分开，mid点电压为0。

以开关频率为500 Hz（电网频率10倍）为例，其mid点的输出波形如图3所示。

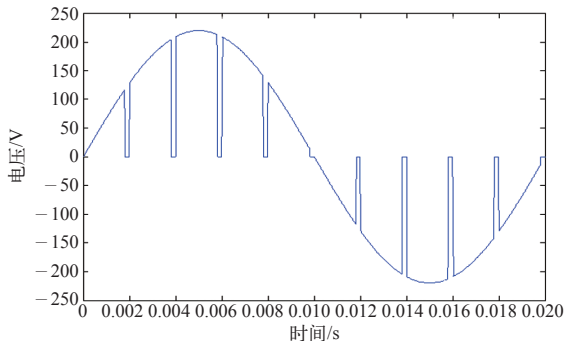


图3 mid点输出波形（500 Hz）

对以上波形进行傅里叶频谱分析可以得到如图4所示结果。

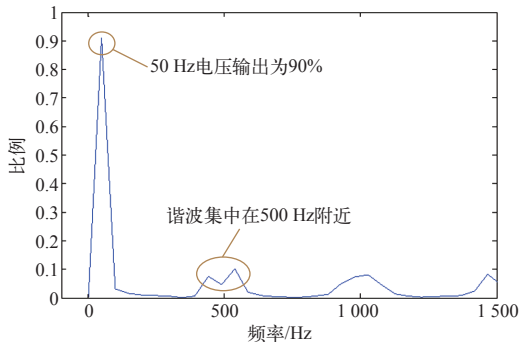


图4 mid点输出波形频谱分析（500 Hz）

在500 Hz的开关频率之下，图4中所示的电网电压已经下降为原输出电压的90%，达到了降压目的。主要问题在于谐波电压较大，超过了15%，且集中在500 Hz的中频区，较难滤波。

使用电力电子器件IGBT实现SW₁开关，可以实现50 kHz的开关频率，其输出如图5所示。

如图6所示，当SW₁的开关频率达到50 kHz之后，谐波的比例虽然不变，但主要集中在了50 kHz附近，完全可以通过简单的低通滤波器实现标准的正弦输出。

通过L与C₂组成了LC低通滤波器，其滤波器的特性可以保证50 Hz电压波形的衰减在0.1%左右，而50 kHz的谐波波形的衰减为99%以上，从而实现out点近乎标准、无谐波的电压输出。

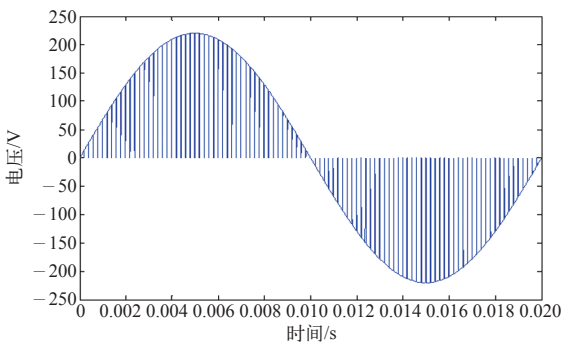


图5 mid点输出波形（50 kHz）

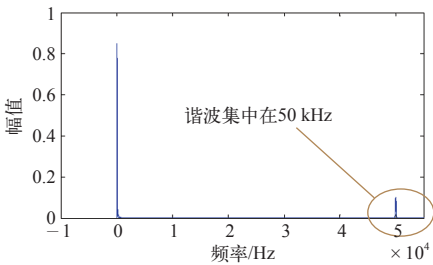


图6 mid点输出波形频谱分析（50 kHz）

3 基于“交—交”斩波降压技术的节能器在绿色照明工程建设方面的应用

基于该型路灯节能器，该市电力管理部门对全市共78条线路的回路进行了节能改造。为了在大规模投资前先一步验证该型节能器的节能效果，以评估照明项目的资本回收周期，本项目设计了“单线路短期试验”以及“多线路长期现场试验”两组现场试验，分别检验设备的节能率、电能质量、路面照度以及实际运行的节能率，现简要介绍如下。

(1) 单线路短期试验

该试验目的在于证明节能设备工作的有效性及可行性。选择该市某主要干道一段路灯线路作为测试线路。该段线路是该市主要的交通干道，基于上述的相关分析，该线路不允许安装传统的节能措施，只能使用安装该新型节能器。安装前后线路的节能效果如表1所示。

表1 安装节能器前后路灯线路节电评估表

相序	安装前线路输入端		安装后线路输入端	
	电压/V	电流/A	电压/V	电流/A
A	231	41	191	33
B	236	44	192	36
C	239	46	191	35

由表1容易计算得到，该条线路A、B和C三相的总节能比为34.8%。观察表1中各相的电压电流，可以看出，输入端的电压B、C相均超过了国家标准规定的235 V上限，且A、B和C相电压存在着较为明显的三相不平衡现象。安装该型节能器后，三相不平衡现象得到了极大的改善，能改善线路变压器的日常运行工况，提升路灯线路的电能质量。

安装新型节能器前后线路电流的谐波含量如表2所示。

表2 安装节能器前后路灯线路谐波含量对比

相序	安装前线路输入端		安装后线路输入端	
	电流/A	谐波含量(%)	电流/A	谐波含量(%)
A	41	2	33	2
B	44	2	36	2
C	46	1	35	1

由表2可知，由于该新型节能器基于先进的“交—交”斩波降压技术，几乎没有增加线路的电流的谐波含量，保护了城市电网不受污染。这不仅证明了计算机仿真结果的正确性，并再次证明了该新型节能器的先进性。

为了保证安装节能器后，该段路灯线路的路面照度达标，选择了200 m范围内平均分布的20个点测量，并选择节能器输出电压为180 V、190 V、200 V及210 V分别测试，测量结果如表3所示。

表3 安装节能器前后路面照度对比

电压/V	安装前平均照度/lm	安装后平均照度/lm
180	21.3	21.3
190	25.6	25.6
200	29.7	29.7
210	33.5	33.5

根据国家标准，该路段线路深夜时的达标照度为20 lm。由表3可知，选择180~190 V中间的电压，即可在获得超过35%的节能效率的同时，满足路面照明要求。

(2) 多线路长期现场试验

该试验目的在于证明节能设备对城市线路状况的适应性，并具体测算安装该新型节能器后，由于解决了城市电网电压夜间升高问题，所达到

的实际节能率。

该试验共选择5条主干线路，安装该新型节能器进行测试。所运行的路段中，既包含了普通的照明灯具，也包括了金属卤化物灯等装饰类灯具。节能器根据运行时段不同，设定的输出节能电压如表4所示。

表4 各时段节能电压设定值

时段	电压/V
19: 00~23: 00	220
23: 00~1: 00	200
1: 00~5: 00	195
5: 00~7: 00	205

试验由2010年9月1日开始到2010年9月30日结束共执行一月。奇数天时，关闭节能器运行；偶数天时，开启节能器运行，从而实测得到的各路段节能率如表5所示。

表5 各路段实测节能率

路段名	节能率(%)
干道1	23
干道2	31
干道3	33
干道4	28
干道5	29

一个月的试验运行过程中，并未发生由于电压突降所导致的路灯突熄事故，证明该节能器对该市的道路照明系统适应良好。同时，由表5可知，该节能器在实际运行过程中，平均节能率达到29.3%，这进一步证明了该型节能器对绿色照明工程建设的推动作用。

4 结束语

工程实施城市的路灯建设，由于技术的限制，一直无法深入挖掘城市的节能潜能。基于该城市夜间的电网电压过高所导致的电能浪费问题，本文提出了采用一种基于“交—交”斩波电力电子技术的新型节能器，以达到绿色照明工程建设的目的。

该新型节能器利用电力电子开关器件控制路
(下转第65页)

力市场短期内变化动态,通过可量化指标参数体现市场短期变化规划,避免项目投资的盲目性,提高投资效率,增强投资效益。

5 结束语

力求所建模型考虑各种影响因素尽可能周到,所建模型尽可能完善,然而周到和完美是相对的。

本文分析提出影响短期用电量的主要因素除了经济社会因素外,还包括气象条件和节假日等,并发现了气温与用电量存在二次方的关联关系。随后利用用电量在时间分布上具有惯性的特征,提出了气温与用电量的滞后回归模型,针对工作日、休息日、固定假日和移动假日用电量的差异进行了节假日虚拟化变量处理。综合获得了短期用电量预测模型,最后针对该模型进行了动态预测和静态预测方法的实证分析。对比预测用电量和实际用电量数据评估结果,平均相对误差较低,说明该模型具有较高的准确性和可用性。

在今后的模型的应用过程中,可进一步增加相关重要的指标(如空调器拥有比例),逐渐完善模型。另外为增强模型数据组织的时效性,可采用与时俱进的方式每年更新一次模型,进一步提高模型的准确性和实用性,为地区项目投资管理提供重要的技术支撑;同时进一步考虑各地区

差异化影响因素,全面完善模型,使之适用于共性的同时兼顾特性。

参考文献

- [1] 毛李帆,江岳春,龙瑞华,等.基于偏最小二乘回归分析的中长期电力负荷预测[J].电网技术,2008(19):71-77.
- [2] 康重庆,夏清,张伯明.电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J].电力系统自动化,2004(17):1-11.
- [3] 傅守强,汪莹,刘素伊,等.基于市场的中长期电力消费需求预测[J].电网与清洁能源,2015,31(7):74-80.
- [4] 龙瑞华,毛弋,毛李帆,等.基于诱导有序加权平均算子和马尔可夫链的中长期电力负荷组合预测模型[J].电网技术,2010(3):150-156.
- [5] 高铁梅.计量经济分析方法与建模: Eviews应用及实例[M].北京:清华大学出版社,2009.
- [6] 古扎拉蒂.计量经济学第[M].3版.林少宫,译.北京:中国人民大学出版社,1999.
- [7] 黄晖,李鸿琪.马克威统计分析与数据挖掘应用案例[M].北京:中国统计出版社,2012.
- [8] 毛玉凤.基于时间序列分析的电力需求预测及季节调整模型的研究[D].北京:北京工业大学,2013.

(收稿日期:2016-10-15) **EA**

(上接第24页)

灯两端的电压的大小,达到了降低路灯的功率以节约电能的目的,相对于该市目前的节能技术,有着非常明显的优势。

两组现场试验的结果发现,该新型节能器能在保证路面照度达标的条件下,达到超过35%的节能率。同时对该市城市路灯线路适应性良好,能在实际运行过程中,达到约30%左右的节能率。

参考文献

- [1] 郝书堂.路灯[M].北京:中国电力出版社,

2008.

- [2] GB/T 12325—2008 电能质量供电电压允许偏差[S].
- [3] 鲍民.国内照明节能控制设备的性能比较[J].道路照明,2004,8(1):41-42.
- [4] CJJ 45—2015 城市道路照明设计标准[S].
- [5] 周剑,陈汝义,王长友.交流斩波调压技术在路灯节能上的应用[J].江苏电器,2008(12):45-47,64.

(收稿日期:2015-11-19) **EA**