

# 并联补偿装置节电量测量相关标准的研究综述

孔繁婷<sup>1,2</sup>,陈健<sup>1,2</sup>,邸梅仙<sup>3</sup>,付宝鑫<sup>1,2</sup>,王建全<sup>1,2</sup>

(1.天津天传电控设备检测有限公司,天津 300399;

2.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;

3.中国质量认证中心,北京 100070)

**摘要:**电力系统日趋电力电子化,电能质量问题带来的电网附加损耗日趋严重。解决电能质量问题成为了帮助电网节能降耗的新途径。最为常见的电能质量治理产品是并联补偿装置,它在治理电能、节能降耗的同时也是一个耗能产品,因此它真正的节电量成为了用户关注的重点。在检验检测领域内展开相关标准的研究现状分析,梳理概括了目前国内外对节能量、节电量、并联补偿装置节电量测量和验证标准研究方向,指出了在检验检测领域内节电量测量和验证的标准体系尚且存在的问题,最后从问题导向和市场导向两方面提出了并联补偿装置节电量测量和验证的标准体系的发展趋势。

**关键词:**节电量;标准;研究现状;存在问题;发展趋势

中图分类号:TM50 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd24668

## Summary on Related Standards About Measurement Power Savings of Parallel Compensation Device

KONG Fanting<sup>1,2</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>, DI Meixian<sup>3</sup>, FU Baoxin<sup>1,2</sup>, WANG Jianquan<sup>1,2</sup>

(1.Tianjin Tianchuan Electric Control Equipment Test Co.,Ltd.,Tianjin 300399,China;

2.Tianjin Research Institute of Electric Science Co.,Ltd.,Tianjin 300180,China;

3.China Quality Certification Centre,Beijing 100070,China)

**Abstract:** Electric power system is becoming more and more power electronization with each passing day, additional losses of the power grid caused by the power quality problem is becoming more and more serious with each passing day. Solving the power quality problem has become the new way to help the power grid to save energy and reduce consumption. The most common power quality management product is parallel compensation device, it can control the power quality, save energy and reduce consumption, but it is a kind of energy consumption product, therefore its real power savings has become the focus of users. The research status of the relevant standards within the field of inspection and testing was analysed, the research directions of domestic and foreign standards about measurement and verification of energy savings, power savings, power savings for parallel compensation device were summarized. Then the standards system problems about measurement and verification of power savings within the field of inspection and testing were pointed out. At last the development trend of standards system about measurement and verification of power savings from the problem-oriented and market-oriented two aspects was put forward.

**Key words:** power savings; standards; research status; existing problem; development trend

节能减排是解决我国能源问题的有效途径,我国一直将节能降耗作为一项重要的战略性工作。电力行业既是能源的供应行业,也是消耗行业。现今低压配网采用更换变压器、优化供电半径等传统的节能降损方法已进入瓶颈期。随着科技、经济的飞速发展,电网结构日益复杂,分布

式新能源、电动汽车充电桩等新型配电设备的加入使得电力系统日趋电力电子化,也带来了严重的电能质量问题,经统计测算,电能质量问题引起的电网附加损耗占总损耗的30%左右。因此,治理电能质量问题成为了电网实现节能降耗的新途径。电能质量治理技术包括串联补偿技术、

基金项目:天津电气科学研究院有限公司重点类项目(JC2022ZL001)

作者简介:孔繁婷(1988—),女,硕士,高级工程师,Email:cherrykey0722@sina.com

并联补偿技术。并联补偿较为常用,主要治理负荷侧的电能质量问题,解决低压配网的谐波、三相不平衡等问题。主要的治理装置有并联无功补偿装置、有源电力滤波装置、电能质量综合补偿装置等,可以将它们统称为“并联补偿装置”。

并联补偿装置能够提高功率因数,减少设备的功率损耗;稳定系统电压,改善电能质量;改善谐波、三相不平衡,降低电网附加损耗。并联补偿装置在治理电能、节能降耗的同时也是一个耗能产品,补偿率高的产品损耗也高,所以无论是测定装置的补偿率还是损耗都无法直接判断装置节能性的好坏。用电企业选择加装电能质量治理装置的初衷就是为了节约电量、减少经济损失,因此节电量关系到直接经济利益,是用户关注的重点。无论是作为企业产品研发测试的依据,还是检验检测行业产品测试的规范,还是用户购买和验收产品的参考,还是对并联补偿装置进行公平公正的节能性评价,节电量测量和验证的方法的标准化建立都尤为重要。

目前,在行业内已经确立了一些节电量测量和验证的标准,这些标准有的研究了节能量测量和验证的一般方法学;有的将“节能量”的概念引入到电力行业中,并且提出了“节电量”的新概念;有的在节能项目中划定了具体的项目边界对节电量进行测量。但这些标准中存在一个共同的问题就是在节电量测量和验证时由于补偿前端的阻抗情况和负载工况的不统一,导致了测量结果的随机性比较强,没有可比性。因此在检验检测行业内,亟需确立一套统一的方法标准,使得节电量的测量结果具有可比性,以此用于产品节能性优劣的评价。

## 1 研究现状

在 20 世纪 90 年代美国能源部推出《国际节能效果测量和验证规程》(IPMVP),首版只有 1 卷《确定节能量和节水量的概念和方法》,该卷中首次明确了节能量和节水量相关的术语定义,针对节能量和节水量测量提出了项目计划等。2002 年增加了第 2 卷《室内环境质量(简称 IEQ)问题评价方法》、第 3 卷《新建建筑和可再生能源对于 IPMVP 的应用》。目前沿用至今的是 2012 年更新的第 7 版,该版明确定义了测量和验证(M&V)计划,规范了测量和验证(M&V)计划的 6 个原则,给出了节能量的通用方程式,收集并分

析了全世界大量的节能量测量和验证的优秀案例。目前国内的各行各业的标准、规程和文献均是以 IPMVP 为基础衍生来的。

2012 年中国标准化研究院等起草并发布了 GB/T 28750—2012《节能量测量和验证技术通则》,标准中给出了节能量的定义,沿用了《国际节能效果测量和验证规程》(IPMVP)中测量和验证(M&V)计划,是一个通则性的标准,它对节能项目的节能量评估有指导性作用。在国内首次定义了项目边界的概念和节能量计算的基本公式<sup>[1]</sup>,如下式所示:

$$E_s = E_r - E_a \quad (1)$$

式中: $E_s$  为节能量,kW·h;  $E_r$  为统计报告期能耗;  $E_a$  为校准能耗。

继 GB/T 28750—2012 之后,2015 年中国标准化研究院等又起草并发布了 GB/T 32045—2015《节能量测量和验证实施指南》,该标准在 GB/T 28750—2012 整体概念的基础上对节能类技术项目给出了较为详细的节能量测量和验证的实施步骤和技术要点,说明了节能项目的实施步骤及节能量测量和验证的实施步骤是如何衔接的,其中实施步骤衔接示意图<sup>[2]</sup>如图 1 所示。标准中还具体地提出了三种节能量的计算方法:“基期-影响因素模型法”、“直接比较法(开-关法)”、“模拟软件法”,并且介绍了三种方法适用的典型项目情况,具有参考意义。

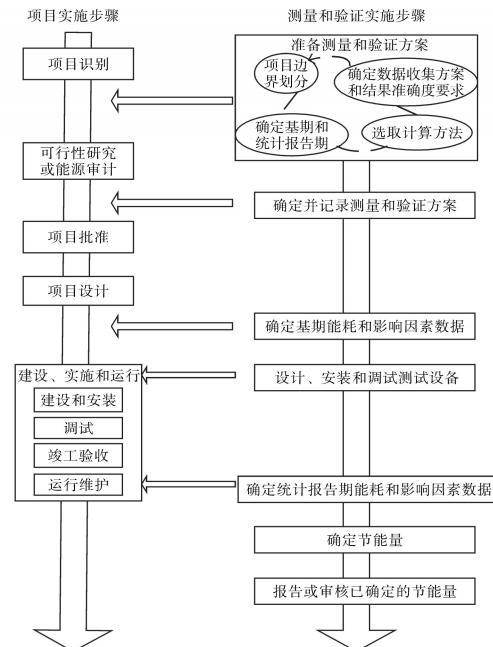


图 1 项目的实施步骤与节能量测量和验证的实施步骤衔接示意图

Fig.1 Connection schematic on implementation steps for project and for measurement and verification of energy savings

2016年电力行业紧跟国家政策,由中国电力科学研究院等起草并发布了标准GB/T 32823—2016《电网节能项目节约电力电量测量和验证技术导则》,该标准将前文中的国标GB/T 28750—2012和GB/T 28750—2012中“节能量”的基本概念引用到电力行业中,并且修改提出了“节电量”的概念应用至电力节能项目中,同时将节电量转化为电网节能项目中节约的有功损耗,有功损耗按照下式<sup>[3]</sup>进行计算:

$$\Delta P = \frac{E_s}{h} \quad (2)$$

式中: $\Delta P$ 为节约的有功损耗,kW; $h$ 为并网发电的小时数,h。

此标准同时对电力系统中节电量的测量和验证技术具有一般性的指导作用,但缺乏一定的可操作性。

2018年随着电网呈现电力电子化日趋严重,电能质量装置大量地投入电网中应用,针对电能质量治理装置的节电量问题,中国电力科学研究院等也相应地起草和发布了标准GB/T 36571—2018《并联无功补偿节约电力电量测量和验证技术规范》,此标准对节电量选用了直接比较法(开-关法)的计算方法,严谨地考虑了统计测量期内的不同工况,用统计学的方法计算,即节电量统计测量期内为各种工况下节电量的总和,见下式<sup>[4]</sup>:

$$\Delta(\Delta E) = \sum_{i=1}^n \Delta E_i \quad (3)$$

式中: $\Delta(\Delta E)$ 为统计报告期节约的电量,kW·h; $\Delta E_i$ 为第*i*种工况运行时段节约的电量,kW·h; $n$ 为统计报告期划分的工况时段数。

在GB/T 36571—2018《并联无功补偿节约电力电量测量和验证技术规范》的附录中用并联补偿装置节能项目举例,划定了项目边界,示意图<sup>[4]</sup>如图2所示,首次将项目边界具象化,建立了等值电路,依托具体的项目进行了节电量计算的理论推导,最后还对测量和验证方法不确定度的分析与评定提出了要求。该标准中规定的方法详尽,可操作性强,但却有一定的局限性,节电量测量结果受工况的影响不具备可比性和普适性。

电力企业更为关注节电量的测量和验证的工作,2020年深圳化工能源技术有限公司等电力企业联合起草并发布了团体标准T/GEIA11—2020《配用电系统节电装置节电量测量和验证技

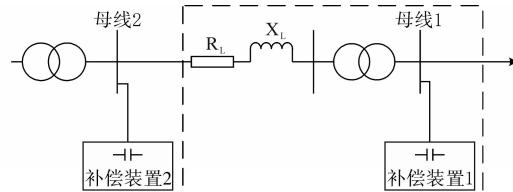


图2 项目边界示意图

Fig.2 Schematic on project boundary

术导则》,2021年修订发布了第二版T/GEIA11—2021,标准阐明了适用范围,即测量方在节电装置投入使用后,对产生的节电量进行测量和验证。在这个标准中,对“开-关”的测量方法明确给出了定义,不再是简单的采用,同时规定了测试时间不少于24 h<sup>[5]</sup>,要求配用电系统节电量测量前对负载情况进行调研,并给出了负载模型的参数识别流程,流程图<sup>[5]</sup>如图3所示,尽可能地控制负载的改变对节电量测量产生的影响,保证了测量结果的准确性。标准还首次将节电量的测试报告具体化,以表格的形式规定了测试报告中应记录的数据。此标准的研究方向和应用范围依旧是针对节电装置应用后,仍然是片面的。

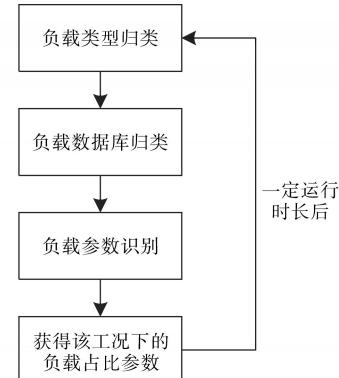


图3 负载参数识别流程图

Fig.3 Flow chart on load parameter identification

## 2 存在问题

行业内对节能量、节电量、并联补偿装置节电量测量和验证的相关标准很多,研究的演变过程逻辑清晰、层层递进。对于产品市场、生产企业研发、检验检测工作这些标准比较片面,缺乏参考性、可操作性。标准GB/T 28750—2012和GB/T 32045—2015作为节能量测量和验证的导则,给出的是一般的方法学,没有针对具体的领域,对并联补偿装置节电量测量和验证的参考性很有限。电力行业发布的一系列标准中,国标GB/T 28750—2012成功地将节能量概念引入到电力行业中,给出了节电量的定义;GB/T 36571—

2018 对并联无功补偿装置的节电量测量给出了验证方案和实施步骤, 规定了测量不确定度的分析和评定, 这种方案是对特定节能项目提出的, 测量和验证在并联补偿装置投入运行的阶段, 选择不同的工况、不同的基期和统计期进行测量; 团标 T/GEIA11 也是如此, 验证方案和实施步骤逐渐完善, 但依旧是对特定的节能项目提出的, 验证的也是节能装置应用后的节电量测量。这就存在一个共同的问题, 并联补偿装置在采用现有的标准体系进行节电量测量和验证时, 由于并联补偿装置应用项目情况的不统一、选择统计测量期的不同、工况情况的不同, 直接导致了节电量的测量结果没有可比性, 无法界定并联补偿装置产品节能性的优劣。

前文提到在并联补偿装置的产品市场上, 单独的测定装置的补偿率和损耗对于产品节能性优劣的评价是没有说服力的。通过分析研究现有的标准体系, 发现体系内没有可行的标准来指导搭建统一的试验平台、采用统一的测量方法对并联补偿装置节电量进行测量和验证。这就导致生产企业在研发阶段无法得到初步的测试, 产品创新无方向, 迭代更新缓慢。检验检测机构测试平台缺失, 节电量数据样本空白, 无法确立装置的节能性评价方法和认证规则, 认证机构的节能认证工作也无法得到开展, 这是市场辨别产品优劣势能力的缺失, 也是检验检测行业认证能力的缺失。

### 3 结论

对并联补偿装置节电量测量和验证的标准现状的梳理可得到如下结论: 电力行业遵照国家标准对节能量测量和验证的通用要求, 制定了电网的节电量测量和验证的一般要求, 并将其通用方法学推广应用至安装节电装置的节能项目中, 统计计算了安装节电装置带来的节电量。此套方法理论在并联补偿装置的应用项目中得到进一步的细化——理论推导、具象化项目边界及建立等值电路。目前这一研究方向已经较为成熟, 从理论到实际操作, 已经可以指导应用并联补偿装置的节能项目的节电量测量和验证的具体工作。

在存在问题的章节(第2节)中分析了并联补偿装置采用现有的标准体系进行节电量的测量和验证, 得到的测量结果在产品市场上并没有参

考价值和可比性, 对产品市场的进步更没有推动作用。因此行业和市场都亟需建立一套新的标准体系, 这套标准需要明确提出统一的测试方法, 保证测量结果的可比性和指导性, 同时需要建立装置节能性的评价规范和技术规则, 对市场上的产品进行节能性优劣的认证。综上, 并联补偿装置节电量测量和验证标准研究的新方向是在检测机构内搭建测试平台实现统一的节电量测量的新方法, 并进行试验验证, 分析试验数据。研究的发展趋势就是解决目前标准体系的局限性, 弥补空白, 将新方法标准化, 用于指导企业研发, 使得市场上产品的节能性更加优异, 促使产品在节能降耗方面迭代更新; 也用于检测机构作为测试依据, 机构可以为并联补偿装置的节电能力提供验证、出具测试报告, 便于用户在数据上直观地进行产品比较, 选择出节能性更优秀的产品; 还可用于认证机构的节能认证依据、节能评价体系的建立。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局/中国标准化管理委员会. 节能量测量和验证技术通则: GB/T 28750—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China / Standardization Administration of the People's Republic of China. General technical rules for measurement and verification of energy savings : GB/T 28750—2012[S]. Beijing: China Standard Press , 2012.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局/中国标准化管理委员会. 节能量测量和验证实施指南: GB/T 32045—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China / Standardization Administration of the People's Republic of China. Guidance on implement of measurement and verification of energy savings : GB/T 32045—2015[S]. Beijing: China Standard Press , 2015.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局/中国标准化管理委员会. 电网节能项目节约电力电量测量和验证技术导则: GB/T 32823—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China / Standardization Administration of the People's Republic of China. General guideline of measurement and verification of electric power and energy savings for energy conservation project of power grid: GB/T 32823—2016[S]. Beijing: China Standard Press , 2016.
- [4] 国家市场监督管理总局/中国标准化管理委员会. 并联无功补偿节约电力电量测量和验证技术规范 中国标准书

(下转第 12 页)

DC-DC 变换器,分析了变换器的基本工作原理,推导了变换器的相关稳态性能,包括电压增益、元器件电压电流应力等。制作了一台 120 W 的实验样机进行了验证。由理论的分析和实验结果可知,变换器具有如下特点:

- 1) 变换器电压增益高,在匝比和占空比不大的情况下,电压增益仍较高;
- 2) 仅使用一个开关管,且其电压应力很低;
- 3) 所有二极管电压应力均很低;
- 4) 多个二极管实现了 ZVS ON 或 ZCS OFF;
- 5) 漏感  $L_{ki}$  降低了 S 导通的电流变化率。

因此,所提变换器适用于新能源并网、电动汽车应用等高 DC-DC 电压增益变换场合。

#### 参考文献

- [1] 罗茜,罗春林,舒朝君,等.基于耦合电感倍压单元的高增益 DC/DC 变换器[J].电气传动,2020,50(12):27-32.  
LUO Xi, LUO Chunlin, SHU Chaojun, et al. High voltage gain DC/DC converter based on coupled inductor voltage-doubler cell[J]. Electric Drive, 2020, 50(12):27-32.
- [2] 马媛,高嵩,陈超波,等.基于拓扑组合的开关电感 Boost 电路[J].电气传动,2019,49(8):47-52.  
MA Yuan, GAO Song, CHEN Chaobo, et al. Switching inductor Boost circuit based on topological combination[J]. Electric Drive, 2019, 49(8):47-52.
- [3] WANG Y, QIU Y, BIAN Q, et al. A single switch quadratic Boost high step up DC-DC converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(6):4387-4397.
- [4] CHEN S, LIANG T, YANG L, et al. A cascaded high step-up DC-DC converter with single switch for microsource applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1146-1153.
- [5] 苏诗慧,雷勇,罗茜,等.一种用于可持续能源的隔离型高增益 DC-DC 变换器[J].电气传动,2021,51(18):23-27.  
SU Shihui, LEI Yong, LUO Xi, et al. An isolated high-gain DC-DC converter for sustainable energy[J]. Electric Drive, 2021, 51(18):23-27.
- [6] TSENG K, HUANG C, CHENG C. A high step-up converter with voltage-multiplier modules for sustainable energy applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power
- Electronics, 2015, 3(4):1100-1108.
- [7] 周悦,孙孝峰.带 CD 单元的两相交错并联高增益 Boost 直流变换器拓扑分析[J].中国电机工程学报,2020,40(15): 5000-5011.  
ZHOU Yue, SUN Xiaofeng. Topology analysis of two-phase interleaved high gain Boost DC converter with CD unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15):5000-5011.
- [8] 杨晓峰,陶海波,杨帆,等.谐振式模块化直流变换器的高增益控制[J].电源学报,2020,18(1):104-115.  
YANG Xiaofeng, TAO Haibo, YANG Fan, et al. High-gain control for resonant modular DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(1):104-115.
- [9] 王挺,汤雨,何耀华,等.多单元开关电容/开关电容有源网络变换器[J].中国电机工程学报,2014,34(6):832-838.  
WANG Ting, TANG Yu, HE Yaohua, et al. Multicell switched-inductor/switched-capacitor active-network converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6):832-838.
- [10] ELLABBAN O, ABU-RUB H, GE B. A quasi-Z-source direct matrix converter feeding a vector controlled induction motor drive[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2):339-348.
- [11] 李雪梅.一种基于耦合电感的单开关高增益直流变换器[J].电气传动,2018,48(11):15-19.  
LI Xuemei. A single switch high voltage ratio DC-DC converter based on coupled inductor[J]. Electric Drive, 2018, 48 (11) : 15-19.
- [12] DING J, ZHAO S, GAO S, et al. A single-switch high step-up DC-DC converter based on three-winding coupled inductor and pump capacitor unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3):3053-3061.
- [13] 罗全明,高伟,吕星宇,等.耦合电感型高增益 Boost 变换器拓扑分析[J].中国电机工程学报,2017,37(24):7266-7275.  
LUO Quanming, GAO Wei, LÜ Xingyu, et al. Topology analysis of high step-up Boost converters with coupled inductors[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):7266-7275.
- [14] 房绪鹏,王晓丽,林强,等.一种耦合电感型准开关 Boost 变换器[J].电气传动,2021,51(16):16-20.  
FANG Xupeng, WANG Xiaoli, LIN Qiang, et al. A quasi-switched Boost converter with coupled-inductor[J]. Electric Drive, 2021, 51(16):16-20.

收稿日期:2022-04-10

修改稿日期:2022-04-19

(上接第 6 页)

- 号:GB/T 36571—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.  
State Administration for Market Regulation / Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for measurement and verification of electric energy and power savings for parallel reactive power compensation project: GB/T 36571—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018.  
[5] 广东省电气行业协会.配用电系统节电装置节电量测量和验

证技术指导:T/GEIA11—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
Guangdong Electric Equipment Industry Association. Technical guide for measurement and verification of power savings devices in power distribution system: T/GEIA11—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.

收稿日期:2022-10-12

修改稿日期:2022-11-03