

# 静止无功发生装置节电量测量方法的研究

卢林<sup>1,2</sup>,孔繁婷<sup>1,2</sup>,张春香<sup>1,2</sup>,陈健<sup>1,2</sup>,王连杰<sup>1,2</sup>

(1.天津天传电控设备检测有限公司,天津 300180;

2.天津电气科学研究院有限公司,天津 300399)

**摘要:**静止无功发生装置治理电能、节能降耗的同时也要消耗电能,因此合理的评价装置节能性成为了亟待解决的问题。对产品的节电量测量技术进行了研究,发现现有的节电量验证方法均不是测试方法,由于现场工况不统一,使得结果没有可比性,不能成为节能评价的数据支撑;而目前在检验检测领域内没有一套行之有效的测试方法可用于第三方检测实验室开展产品的节电量测量工作,这使得检测工作和节能评价工作均无法开展。为了弥补以上提出的检测技术空白,创新性地提出了设计模拟电阻的测试方法,以此辅助完成静止无功发生装置节电量测量工作。在实验室内搭建测试平台,验证了该方法的可行性与正确性,并且评定了测量结果的离散性。最终得出结论,所提方法可用于第三方实验室完成节电量测量,灵活可控的试验条件能够满足生产企业的各种工况要求,并且测量结果具有可比性,能够成为节能评价的数据支撑,促进产品迭代更新,推动行业进步。

**关键词:**静止无功发生装置;节能;节电量测量方法

**中图分类号:**TM50 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26124

## Research on Power Savings Measurement Method of Static Var Generator

LU Lin<sup>1,2</sup>, KONG Fanting<sup>1,2</sup>, ZHANG Chunxiang<sup>1,2</sup>, CHEN Jian<sup>1,2</sup>, WANG Lianjie<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Tianchuan Electric Control Equipment Test Co., Ltd., Tianjin 300180, China;

2. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300399, China)

**Abstract:** Static var generator (SVG) can governance power quality, energy conservation and reduce consumption, furthermore it is an energy consumption product. The reasonable evaluation of the energy saving of the device has become an urgent problem to be solved. The power saving measurement technology of products was studied, and it was found that the existing power saving verification methods are not test methods. Because the field conditions are not unified, the verification results are not comparable. They can not be the data support of energy saving evaluation. At present, there is no set of effective testing methods in the field of inspection and testing that can be used for the power saving measurement of products in third-party testing laboratories, which makes both the testing work and energy saving evaluation work cannot be carried out. In order to make up for the above proposed detection technology gap, the innovative test method of design simulation resistance was proposed, so as to help complete the power saving measurement work. And a test platform was set up in the laboratory, to verify the feasibility and correctness of the method, and to assess the dispersion of the measurement results. The final conclusion is that the proposed method can be used for the third-party laboratory to complete the power saving measurement, flexible and controllable test conditions, can meet the requirements of various working conditions of the manufacturer, and the measurement results are comparable, can become the data support of energy saving evaluation, promote product iteration and update, and promote the progress of the industry.

**Key words:** static var generator (SVG); energy conservation; power savings measurement method

时代不断进步,经济不断发展,能源紧张日益加剧,节能降耗工作愈发受社会各界关注。电

力行业作为高耗能产业在节能技术方面的研究从未停止。静止无功发生装置(以下简称“装

**基金项目:**天津电气科学研究院有限公司重点类项目(JC2023ZL001)

**作者简介:**卢林(1982—),男,硕士,高级工程师,Email:lulin@tried.com.cn

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

置”)是基于电压源变流器的动态无功补偿装置,以IGBT为核心器件组成自换相桥式电路,以直流电容器作为储能元件,是目前较为先进的无功补偿技术。装置并联于电网中,相当于一个可变的无功电源,根据无功负载情况,不间断地调节输出无功功率,实现无功补偿,提高功率因数,稳定系统电压,降低电能损耗<sup>[1]</sup>,以此提高电网运行的经济性。它有户内、户外、高压、低压多种类型,适用于各种油田、化工、铁路、港口、轧机、提升机等重工业负荷及波动频繁且波动幅度较大的场合,以单相用电为主的电网公用配电变压器,对电力系统稳定和经济运行等方面具有重要作用。静止无功发生装置补偿效果显著,补偿后的功率因数可达0.98;补偿响应速度快,动态响应时间一般小于1 ms;自身损耗较低,一般低于5%,优异的性能直接保证了节能效果的显著,目前产品市场上对它的研究更是精益求精,不断提高装置性能,如改进无功补偿率、降低损耗、提高补偿响应时间等,以达到更好的电能治理、提高电能利用率、节能降耗的效果。

静止无功发生装置补偿无功,节能降耗的同时自身也要消耗电能。因此如何合理地评价产品的节能性,如何直观地选择出节能性优的产品,成为当下需要解决的问题。目前在检验检测技术领域,典型的产品节能测试方法是对产品进行温升试验,待产品内部温度达到稳定状态时对其损耗进行测试<sup>[2-3]</sup>。这种方法测试了装置的损耗,忽略了装置本身的功能性,显然是片面的。装置的节能评价对于用户端就是节电量的多少,它直接关系到用户端的经济利益。因此选择测量节电量的方法对装置节能性进行评价是合理且直观的。

目前,在行业内已经确立了一些节电量测量和验证的标准,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,但这些研究存在一个共同的问题是它们均是节电量验证方法,不是在第三方实验室的测量方法,电力网络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。国际能效测评组织编写的《国际能效测量和验证规程》和国内的GB/T 28750—2012《节能量测量与验证技术通则》,这些技术通则介绍了关

于节能量测量与验证的统计学方法,对于节电量的测量仅有概念性的借鉴作用,也并未给出具体测量的方法。节电量的概念本身是由节能量引申而来的,国内、外可查阅的关于节电量测量的标准与技术规范则更为稀少,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》将“节能量”的基本概念引用到电力行业中,提出了“节电量”的概念,同时将节电量转化为电网节能项目中节约的有功损耗<sup>[4]</sup>。此标准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,但缺乏具体的测试方法。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》给出了具体项目中节电量的验证方法,详细介绍了项目边界的划分方法<sup>[5]</sup>。具有一定的参考性,但标准中的方法不能直接用于第三方实验室进行节电量测量,这些标准给出的方法是节能项目的验证方法,验证条件、现场工况的不同使得测量结果无可比性,不能作为节能性评价的数据支撑。2021年修订发布了第二版T/GEIA11—2021《配用电系统节电装置节电量测量和验证技术导则》,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”法的验证方法给出了明确的定义<sup>[6]</sup>,但该团标中的方法同样是针对特定的节能项目而提出的,验证的是节能装置应用在项目中的节电量,同样不适用第三方实验室进行节电量测量。

综上所述在检测技术领域内采用传统节能性研究的方法对静止无功发生装置节能性进行研究是片面的,同时现有的节电量验证技术的标准均具有一定的参考性,如概念的引入、项目边界的划分、“开-关”法的验证方法、节电量计算公式等,但这些标准并没有提供明确的测量方法,用以实现在第三方实验室完成测量。针对以上两方面问题,本文创新性地提出了设计模拟电阻的方法,用于检验检测领域内开展静止无功发生装置的节电量测量。该方法能够在第三方实验室内完成测量,测试条件的统一使得测量结果具有可比性,可用于装置节能性评价的数据支撑。

## 1 节电量测量方法设计

### 1.1 节电量测量设计前提

电能质量治理技术包括串联补偿技术和并联补偿技术,静止无功发生装置是一种并联补偿

技术产品,主要治理负荷侧的电能质量问题,可解决无功补偿、谐波、三相不平衡等问题<sup>[7]</sup>,因此节电量测量方法的设计有如下前提:

1)明确项目边界是补偿点至上一级无功电源之间的电力网络,如图1所示为负荷侧高供低的电力网络,装置并联在系统中。

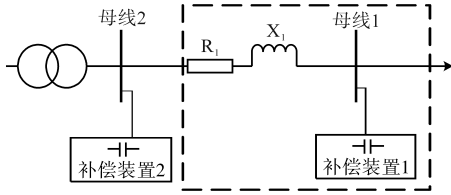


图1 项目边界示意图

Fig.1 Schematic diagram on project boundary

2)选用直接比较法,即“开-关”法。“开-关”法适用范围是节能措施可关闭且关闭后不影响正常运行的项目<sup>[6]</sup>。静止无功发生装置并联在负荷与电源之间,投入或切除均不影响电力网络的正常运行,故可选择“开-关”法。

3)节电量计算。根据下式<sup>[8-9]</sup>计算节电量,装置运行前电能损耗减去装置运行后电能损耗,所以最终节电量的结果是负值。

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

式中: $\Delta E_s$ 为节约的电能,kW·h; $E_a$ 为装置运行前电能损耗,kW·h; $E_r$ 为装置运行后电能损耗,kW·h。

### 1.2 节电量计算推导

项目边界内的等值电路如图2所示,根据等值电路进行节电量计算公式推导。

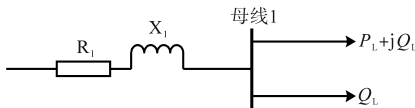


图2 项目边界内等值电路图

Fig.2 Equivalent circuit within project boundary

1)静止无功发生装置运行前电力网络有功损耗为 $\Delta P_a$ ,kW;根据下式计算:

$$\Delta P_a = (P_L^2 + Q_L^2)/U_N^2 \cdot R_1 \quad (2)$$

式中: $P_L$ 为有功负荷,kW; $Q_L$ 为无功负荷,kvar; $U_N$ 为补偿点运行电压,kV; $R_1$ 为项目边界内的电力网络等值电阻, $\Omega$ 。

2)静止无功发生装置运行后电力网络有功损耗为 $\Delta P_r$ ,kW;根据下式计算:

$$\Delta P_r = \frac{P_L^2 + (Q_L - Q_r)^2}{U_N^2} R_1 \quad (3)$$

式中: $Q_r$ 为装置投运后补偿的无功功率,kvar。

3)静止无功发生装置运行后节约的电力为

$\Delta(\Delta P)$ ,kW;根据下式计算:

$$\Delta(\Delta P) = \frac{P_L^2 + (Q_L - Q_r)^2}{U_N^2} R_1 - \frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_N^2} R_1 + KQ_r \quad (4)$$

式(4)简化得到下式:

$$\Delta(\Delta P) = Q_r \left( \frac{Q_r - 2Q_L}{U_N^2} R_1 + K \right) \quad (5)$$

式中: $K$ 为装置损耗,%。

此处定义无功经济当量<sup>[3]</sup> $C=(Q_r - 2Q_L)/U_N^2 R_1$ ,则式(5)可简化为 $\Delta(\Delta P)=Q_r(C+K)$ 。无功经济当量为电力系统中每减少单位无功功率引起的系统有功损耗的下降量。

4)静止无功发生装置运行后的节电量为 $\Delta(\Delta E)$ ,kW·h;根据下式进行计算:

$$\Delta(\Delta E) = \Delta(\Delta P)T \quad (6)$$

式中: $T$ 为运行时间,h。

### 1.3 节电量测量方法设计

由分析推导出的式(5)可知静止无功发生装置的节电量与装置前端电力网络的阻抗有关。电力网络中电感不消耗电能,电阻则是主要的耗能元件,测量装置节电量就是测其前端电力网络内电阻的节电量。故本文提出了一种模拟电阻的设计,用以模拟装置前端电力网络的等值电阻。设计原理图如图3所示,试验电源采用集成式电网模拟可调电源,额定容量1 000 kV·A,输出相电压范围0~700 V任意电压可调节,输出最大可持续电流1 520 A;试验负载采用RLC可调负载,无功负载容量-800~+800 kvar任意可调,有功负载610 kW;测量设备为HIOKI公司的HITESTER 3169-20/21功率分析仪;模拟电阻的阻值可调节。装置并联接入试验电源与试验负载之间,模拟电阻串联接入试验电源与装置之间。按照原理图搭建试验平台对节电量的测量进行验证,步骤如下:

1)根据静止无功发生装置额定容量,设定无功负载大小,系统运行,装置满载投入,测量装置损耗与额定补偿率。

2)根据静止无功发生装置额定容量,设定无功负载大小,系统运行,装置不运行,在规定的运行时间内用功率分析仪测量模拟电阻上的电能损耗。

3)根据静止无功发生装置额定容量,设定无功负载大小,系统运行,装置投入运行,与步骤2)运行时间相同,同样用功率分析仪测量模拟电阻上的电能损耗。

4)装置运行前后,即步骤2)和步骤3)测得模拟电阻上电能损耗的差值即为装置的节电量。

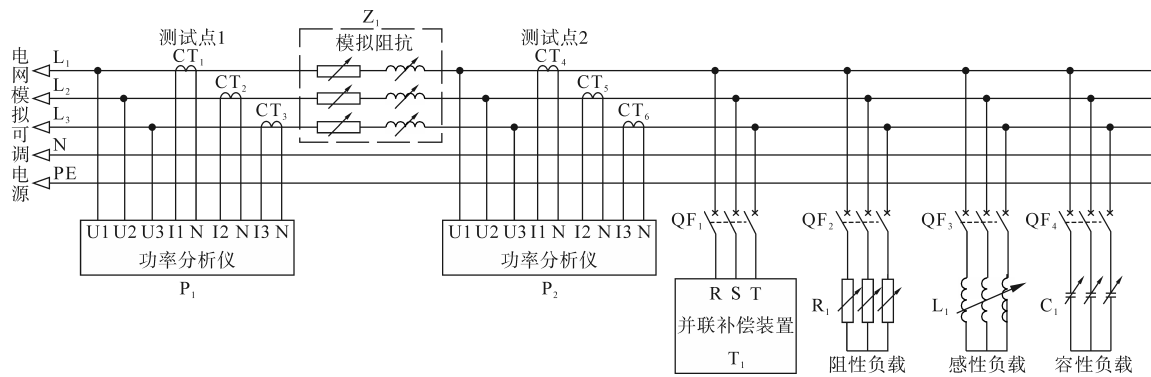


图3 试验原理图

Fig.3 Test schematic diagram

## 2 试验验证

### 2.1 模拟电阻的确定

静止无功发生装置应用于负荷侧,前文明确了项目边界是补偿点至上一级补偿点之间的电力网络,因此装置前端电力网络内的电能消耗元件为电线电缆内阻、开关柜回路电阻,由于开关柜回路电阻数据为 $\mu\Omega$ 级,对电能消耗的影响很小,故此处忽略不计。因此确定模拟电阻的问题转化为确定电线电缆的阻值,而电线电缆的阻值与线径、长度、电阻率有关,根据下式进行计算:

$$R = \rho \cdot L / S \quad (7)$$

式中: $R$ 为每相电线电缆的阻值, $\Omega$ ; $\rho$ 为电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ ; $L$ 为电线电缆长度, $\text{km}$ ; $S$ 为电线电缆的线径, $\text{mm}^2$ 。

1)电线电缆的线径 $S$ 应与装置额定补偿容量、额定电流相匹配,电线电缆的线径不得小于装置额定电流对应的线径。表1中列举了常见装置额定容量对应的额定电流及线径。

表1 常见装置容量对应线径

额定补偿容量/kvar	额定电流/A	对应线径/ $\text{mm}^2$
50	72.2	25
100	144.4	50
150	216.5	95
200	288.6	185

2)电线电缆的长度 $L$ 由配网供电半径决定,我国对供电半径的长度有标准要求,中压配电线路小于6 km,低压配电线路小于500 m<sup>[10]</sup>。

3)电线电缆的电阻率 $\rho$ 可在国家标准或行业标准中查询获得。国家标准或行业标准中会给出典型线型在指定截面积下的最大电阻,即为电线电缆的电阻率。

4)由于电阻阻值受温度影响大,基本电阻确定后还要加上温度附加电阻,根据下式计算:

$$R_t = k_a (t - 20) R \quad (8)$$

式中: $R_t$ 为每相电线电缆的温度附加电阻阻值, $\Omega$ ; $k_a$ 为温度系数; $t$ 为环境平均温度, $^\circ\text{C}$ 。

### 2.2 节电量测量

由于该方法设计的模拟电阻、负载均是可调节的,因此可以根据生产企业验证所需灵活调节模拟电阻值与负载大小,模拟各种电力网络与负载工况。而当下要进行试验验证需预先确定好前提,首先选择研究的电力网络为用户侧高供低的电力网络,供电半径拟定为500 m,此数据用于确定模拟电阻的长度。其次试验样品选额定容量100 kvar的静止无功发生装置,装置的额定电流为144.4 A,根据表1确定模拟电阻的线径为50  $\text{mm}^2$ 。第三查阅国家标准/行业标准选择几种常用线型的电阻率,如表2第一列所示。试验验证的环境温度为18  $^\circ\text{C}$ ,温度系数 $k_a=0.004$ 。最后按照式(7)和式(8)计算模拟电阻的单相等值电阻,如表2第四列所示,经过规约单相等值电阻均约为0.3  $\Omega$ ,故选定该试验样品节电量测量的模拟电阻值为0.3  $\Omega$ ,调节模拟电阻并测量确认阻值,测量结果如图4所示。

表2 模拟电阻计算

线型	50 $\text{mm}^2$ 截面积对应最大电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	基本电阻/ $\Omega$	温度附加电阻/ $\Omega$	单相等值电阻/ $\Omega$
JL	0.579	0.289 5	-0.002 3	0.3
JLHA1	0.664	0.332 0	-0.002 7	0.3
非压紧圆形绞合导体	0.641	0.320 5	-0.002 6	0.3

按原理图绘制试验接线图如图5所示,即为实验室的电网模拟可调电源实际接线情况,模拟

参数	高压 5 A	AB	T <sub>折算</sub> 20.0(℃)	T <sub>温升</sub> 无温升	本机存储
	低压 20 A	ab	T <sub>绕组</sub> 0.0(℃)	分接 0	
测试通道	○ 高压通道		● 低压通道		
测试电流	5 A	20 A			
测试电阻	0.0000 mΩ	315.3 mΩ			
折算电阻	0.0000 mΩ	315.3 mΩ			

图4 电阻值测量

Fig.4 Measure the resistance value

电阻串联接入到电网模拟可调电源与试验样品(EUT)之间,无功负载并联接入测试系统,采用功率分析仪作为测试设备,开始进行试验验证。

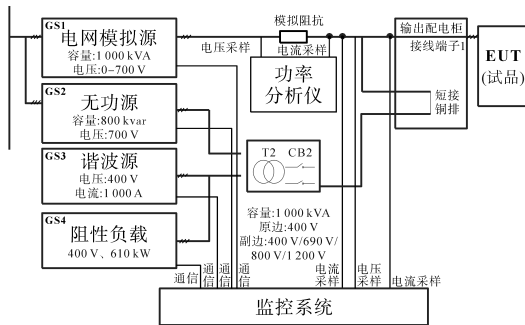


图5 试验接线图

Fig.5 Test wiring diagram

静止无功发生装置的部分性能参数会对节电量结果产生影响,如损耗、额定补偿率等,这些参数的试验结果应作为节能评价数据的一部分。下面对这些参数进行测量,选择装置工作模式为无功跟踪模式,根据样品额定容量100 kvar,设定无功负载为100 kvar,装置满载运行,测量输出有功即为装置损耗,测试结果如图6所示,装置损耗为2.85 kW。

主目录	瞬时值	电路	1	2023/03/20 15:18:05
U1	395.18 V	I1	145.76 A	U 600V × 1.00
U2	395.27 V	I2	145.42 A	I 500A × 1.00
U3	395.38 V	I3	145.73 A	
Uave	395.28 V	Iave	145.64 A	
P1	- 0.99 kW	Q	99.67kvar	接线 3P3W3M 电路
P2	- 0.92 kW	S	99.71kVA	× 1
P3	- 0.94 kW	PF	-0.0286	PLL U1 50Hz
P	- 2.85 kW	f	50.011 Hz	间隔 30min
WP+	0.000 kWh		0:00:00	
显示屏	平均值	保持状态		

图6 损耗率测量

Fig.6 Measure the power loss rate

同样选择装置工作模式为无功跟踪模式,设定无功负载为100 kvar,装置满载运行,测量补偿后的无功负载为5.22 kvar,计算装置额定补偿率为94.8%,补偿后结果如图7所示。

测量参数									
Urms[V]	U1-I[V]	F[Hz]	Irms[A]	Θ[*]	PF	P[kW]	Q[kvar]	S[kVA]	
01	230	398.35	50	16.9	0	0.87	-3.38	1.916	3.886
02	230	398.42	50	8.19	240	0.093	-0.175	1.874	1.883
03	230	398.3	50	6.22	120	0.058	0.084	1.429	1.432
Σ						-3.472	5.22	7.201	

图7 额定补偿率测量

Fig.7 Measure the rated compensation rate

装置基本性能参数测试完毕后,开始进行节电量测量,选择装置两种不同的工作模式分别进行试验验证。试验1:设置装置工作模式为无功跟踪模式,依次调节无功负载为25 kvar,50 kvar,100 kvar,装置不运行,每种负载工况均测量2 h的电能损耗;装置运行,每种负载工况均再次测量2 h的电能损耗;计算补偿前与补偿后电能损耗的差值,即为节电量,数据统计如表3所示。

表3 试验验证结果1

Tab.3 Test results 1

负载容量/ kvar	补偿容量/ kvar	运行时间/ h	节电量测量 值/(kW·h)	节电量理论 值/(kW·h)
25	23.7	2	-0.59	-0.91
50	47.4	2	-4.31	-6.53
100	94.8	2	-29.11	-31.71

试验2:设置装置工作模式为恒无功模式,补偿容量设定值为25 kvar。依次调节无功负载为25 kvar,50 kvar,100 kvar,装置不运行,每种负载工况均测量2 h的电能损耗;装置运行,每种负载工况均再次测量2 h的电能损耗;计算补偿前与补偿后电能损耗的差值,即为节电量,数据统计如表4所示。

表4 试验验证结果2

Tab.4 Test results 2

负载容量/ kvar	补偿容量/ kvar	运行时间/ h	节电量测量 值/(kW·h)	节电量理论 值/(kW·h)
25	23.7	2	-0.59	-0.91
50	23.7	2	-3.21	-5.36
100	23.7	2	-11.30	-14.25

表3与表4中的最后一栏为节电量理论值是用式(6)计算得到的,是非常理想的理论结果。实际在实验室中节电量测量值会受到电阻发热、设备测量精度、装置补偿率波动、装置发热等因素的影响,实际节电效果并不能达到纯理论的情况,即测量结果的绝对值要小于理论结果,而表3、表4中节电量测量值的绝对值均小于理论值,并且测量值与理论值是同一个数量级,结果符合实际情况,可以验证测量方法设计的正确性。再分析表3和表4数据可得在负载较重时,选择装置进行无功补偿节电效果更为显著,也与实际情况相符,进一步验证了测量方法的正确性。

### 3 试验结果不确定度评定

上文对节电量测量方法的正确性进行了分析验证,本节对测量结果的标准不确定度进行评定,进而判断测量结果的离散性。以表3中负载容量100 kvar的测量结果作为数据进行B类标准不确定度评定。国家计量技术规范JJF 1059.1—2012中给出B类标准不确定度评定的计算公式为

$$u_B = a/k \quad (9)$$

式中: $a$ 为被测量可能值的区间半宽度; $k$ 为被测量概率分布的置信因子。

试验的测量设备为HIOKI公司的HITESTER 3169-20/21功率分析仪,因此区间半宽度 $a$ 的确定可通过查阅设备用户手册中的设备精度、分辨力等获得。JJF 1059.1—2012中规定了设备的精度、分辨力引入的不确定度符合均匀分布,因此 $k=\sqrt{3}$ 。

电能损耗为有功损耗乘以运行时间,运行时间为固定数据不需要进行分析,因此建立数学模型为下式,即有功损耗的测量结果标准不确定度为装置投运前测量结果标准不确定度 $u_B(P_a)$ 与装置投运后测量结果标准不确定度 $u_B(P_r)$ 的合成。

$$P = P_a - P_r \quad (10)$$

式中: $P$ 为有功损耗,kW; $P_a$ 为装置投运前的有功损耗,kW; $P_r$ 为装置投运后的有功损耗,kW。

测量结果不确定度的来源包括:功率分析仪的电压测量精度引入的不确定度 $u_{B1}(P_a)$ 、电流测量精度引入的不确定度 $u_{B2}(P_a)$ 、功率测量精度引入的不确定度 $u_{B3}(P_a)$ 、功率分析仪分辨力引入的不确定度 $u_{B4}(P_a)$ ,下面分别进行计算。

#### 3.1 功率分析仪的电压测量精度引入的不确定度 $u_{B1}(P_a)$

查阅功率分析仪的设备使用手册得到单相电压测量精度为 $\pm 0.1\%$ ,则区间半宽度 $a=0.1\%$ ,按照均匀分布 $k=\sqrt{3}$ ,单相电压引入的测量不确定度 $u'_{B1}(P_a)$ 为

$$u'_{B1}(P_a) = \frac{a}{k} = 0.0577\%$$

三相电压引入的测量不确定度为

$$u_{B1}(P_a) = \frac{u'_{B1}(P_a)}{\sqrt{3}} = 0.0333\%$$

#### 3.2 功率分析仪的电流测量精度引入的不确定度 $u_{B2}(P_a)$

查阅功率分析仪的设备使用手册得到单相

电流测量精度为 $\pm 0.1\%$ ,则区间半宽度 $a=0.1\%$ ,按照均匀分布 $k=\sqrt{3}$ ,单相电流引入的测量不确定度 $u'_{B2}(P_a)$ 为

$$u'_{B2}(P_a) = a/k = 0.0577\%$$

三相电流引入的测量不确定度为

$$u_{B2}(P_a) = \frac{u'_{B2}(P_a)}{\sqrt{3}} = 0.0333\%$$

#### 3.3 功率分析仪的功率测量精度引入的不确定度 $u_{B3}(P_a)$

查阅功率分析仪的设备使用手册得到功率的测量精度为 $\pm(0.2\% \text{rdg.} \pm 0.1\% \text{f.s.})$ 。装置额定电流为144 A,测量设备电流满量程设置为500 A,功率满量程设置为75 kW。计算区间半宽度为 $a=0.11284 \text{ kW}$ ,按照均匀分布 $k=\sqrt{3}$ ,功率精度引入的测量不确定度为

$$u_{B3}(P_a) = \frac{a}{k} = 0.065 \text{ kW}$$

#### 3.4 功率分析仪的分辨力引入的不确定度 $u_{B4}(P_a)$

功率分析仪上显示在进行功率测量时分辨力为0.01 kW,区间半宽度 $a=0.005 \text{ kW}$ 按照均匀分布 $k=\sqrt{3}$ ,分辨力引入的测量不确定度为

$$u_{B4}(P_a) = a/k = 0.0029 \text{ kW}$$

#### 3.5 计算标准不确定度

根据JJF 1059.1—2012给出的计算标准不确定度的公式计算装置投运前有功损耗测量的标准不确定度,如下式所示:

$$u_B(P_a) = \sqrt{u_{B1}^2(P_a) + u_{B2}^2(P_a) + u_{B3}^2(P_a) + u_{B4}^2(P_a)} \quad (11)$$

计算前将 $u_{B1}(P_a)$ , $u_{B2}(P_a)$ , $u_{B3}(P_a)$ , $u_{B4}(P_a)$ 的单位按照测量结果的单位进行统一,再计算 $u_B(P_a)=0.07274 \text{ kW}$ 。

重复3.1~3.4节所示步骤,再根据式(11)计算装置投运后有功损耗测量标准不确定度 $u_B(P_r)=0.04354 \text{ kW}$ 。

投运前、投运后的有功损耗测量标准不确定度计算后,再根据不确定度评定的数学模型公式(10)分别对 $P_a$ 和 $P_r$ 求偏导计算灵敏系数,即 $c(P_a) = \partial f / \partial P_a = 1$ 和 $c(P_r) = \partial f / \partial P_r = -1$ ,灵敏系数表示了各输入量的测量不确定度对被测量的标准不确定度的影响。最后按照下式计算合成标准不确定度 $u_B(P)=0.08 \text{ kW}$ 。

$$u_B(P) = \sqrt{[c(P_a) + u_B(P_a)]^2 + [c(P_r) \times u_B(P_r)]^2} \quad (12)$$

试验运行时间2 h,因此节电量测量标准不确定度为 $0.16 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,结果置信区间为 $\pm 0.16 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ,与节电量测量结果相比测量结果标准不确定度较小,证明测量结果离散性小,可信赖程度较高。

## 4 结论

本文分析了静止无功发生装置的功能、性能以及装置本身节电功能与自身损耗之间的矛盾,也提出了目前行业内存在的技术壁垒,即没有一套行之有效的测试方法可被用于在第三方检测实验室内开展产品的节电量测量,这使得检验检测工作和节能认证工作均无法开展。针对以上技术问题本文创新性地提出了静止无功发生装置的节电量测量方法,设计了模拟阻抗辅助完成测量,绘制了试验原理图;在实验室内搭建测试电路进行方法验证以及测量结果的正确性和离散性分析。

该方法在原理上有详实的理论推导作为支撑,在实用性方面,它可用于第三方实验室完成节电量的测量,可控的试验条件,使得节电量测量结果具有可比性;该方法具有一定的灵活性,通过可调的模拟电阻和负载,能够满足生产企业要求的各种无功经济当量和工况;该方法还具有一定的推广性和普适性,首先任何第三方检测实验室都易于达到该方法中所述的测试条件。其次该方法适用于全部并联补偿技术的电能质量治理装置,包括高、低压的静止无功发生装置及有源滤波装置(APF)等。第三方实验室采用此方法经过对不同厂家、不同型号和容量的产品进行节电量测试,收集大量的节电量数据作为支撑,可以逐步形成静止无功发生装置的能效分级,用以进一步评价产品的节能性,促进产品迭代更新,推动行业进步。

### 参考文献

- [1] 张磊,余朋军,卢天林,等.特高压变压器中压侧无功补偿运行电压特性分析[J].高压电器,2021,57(1):100-107,115.  
ZHANG Lei, YU Pengjun, LU Tianlin, et al. Operating voltage characteristics analysis of medium voltage side reactive power compensation for UHV transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 100-107, 115.
- [2] 陈剑.低压成套无功功率补偿装置节能认证技术规范:CQC 3179—2021[S/OL].(2021-12-17)[2024-08-21].<https://www.cqc.com.cn/www/chinese/c/2021-12-17/558552.shtml>.
- [3] 范学铭.高压/低压预装式变电站节能认证技术规范:CQC 3180—2022[S/OL].(2022-07-28)[2024-08-21].<https://www.cqc.com.cn/www/chinese/c/2022-07-28/559153.shtml>.
- [4] 闫华光.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.  
YAN Huaguang. 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.
- [5] 蒋利民.并联无功补偿节约电力电量测量和验证技术规范:GB/T 36571—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.  
JIANG Limin. 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.
- [6] 杨苹.配用电系统节电装置节电量测量和验证技术指导:T/GEIA 11—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
YANG Ping. Technical guide for measurement and verification of power savings devices in power distribution system: T/GEIA 11—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021.
- [7] 孔繁婷,陈健,邸梅仙,等.并联补偿装置节电量测量相关标准的研究综述[J].电气传动,2023,53(7):3-6,12.  
KONG Fanting, CHEN Jian, DI Meixian, et al. Summary on related standards about measurement power savings of parallel compensation device[J]. Electric Drive, 2023, 53(7): 3-6, 12.
- [8] 李鹏程.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.  
LI Pengcheng. Guidance on implement of measurement and verification of energy savings: GB/T 32045—2015[S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [9] 李鹏程.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.  
LI Pengcheng. General technical rules for measurement and verification of energy savings: GB/T 28750—2012[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.
- [10] 胡锡.综合线损率投入与产出量化分析模型及四分策略研究[D].广州:华南理工大学,2017.  
HU Xi. Study on input-output model of comprehensive line loss and decomposition strategy[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

收稿日期:2024-08-21

修改稿日期:2024-10-08