

陈向群,肖湘奇,黄瑞,等.配电网窃电检测与预防策略[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2020,35(4):56-66. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.009

Chen X Q, Xiao X Q, Huang R, et al. Detection and Prevention Strategy of Electricity Theft in Distribution Network[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020,35(4):56-66. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2020.04.009

配电网窃电检测与预防策略

陈向群¹,肖湘奇¹,黄瑞¹,杨茂涛¹,刘远²,陈彦余²,夏向阳^{2*},阳海燕^{2,3}

(1.国网湖南省电力有限公司 供电服务中心(计量中心),湖南长沙 410004; 2.长沙理工大学 电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;
3.国网湖南省电力有限公司 常德供电分公司,湖南常德 415000)

摘要:针对配电网中频发的窃电事件和新的窃电操作方法,本文提出了一种智能在线监测能源盗窃预防策略,可以在不中断供电的情况下进行盗窃检测和预防.该策略通过设计防窃电系统(EPPS),根据对配电网的电压进行调节,为非法连接的负荷提供幅值随机变化的电源电压,且该电源电压远异于正常值.同时,为了维持对真正消费者的不间断供电,电力公司可以建立消费者监督单位(CSU),保持电压调节的稳定性,确保有效运行.最后通过实验证明了所提出的基于EPPS和CSU的防盗方案的适用性、操作灵活性和有效性,所提方法根据用户的数据进行窃电检测,准确率高,同时在不中断电源、不知道配电网确切拓扑结构的情况下,准确控制打击实时场景中的防盗.

关键词:窃电防护;在线监测;用电检查;配电网

中图分类号:TM933 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2020)04-0056-11

Detection and Prevention Strategy of Electricity Theft in Distribution Network

Chen Xiangqun¹, Xiao Xiangqi¹, Huang Rui¹, Yang Maotao¹,
Liu Yuan², Chen Yanyu², Xia Xiangyang², Yang Haiyan^{2,3}

(1. Power Supply Service Center (Metrology Center), State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410004, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;
3. Changde Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changde 415000, China)

Abstract: In view of the frequent electricity theft, new technologies and methods had been developed in the measurement system, that including tamper-proof functions, to prevent theft, but with the development of new technologies, new methods of electricity theft operation had come into being. An energy theft prevention scheme based on on-line monitoring was proposed, which could detect and prevent theft without interrupting power supply. Through the design and implementation of EPPS, the distribution network voltage was adjusted to provide a random amplitude change of power supply voltage which was far different from the normal value for illegally connected loads. In order to maintain uninterrupted supply to real consumers, power companies could establish consumer supervision units (CSU) to maintain the stability of voltage regulation to ensure the effective operation of household appliances. Experiments show that the proposed anti-theft scheme based on EPPS and CSU is applicable, flexible and effective. The proposed method detects electricity theft based on user's data with high

收稿日期:2019-08-25

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目资助(5216A019000U);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ4025)

*通信作者,E-mail:307351045@qq.com

accuracy. At the same time, without interrupting the power supply and without knowing the exact topology of the distribution network, it accurately control anti-theft in real-time scene.

Keywords: electricity theft protection; online monitoring; electricity inspection; distribution network

窃电是一种非常恶劣的社会现象,在过去 100 年左右的时间里,它的消极影响不断扩大,并引起了全世界电力部门的极大关注.不受控制的窃电行为会阻碍配电网的发展,在电力配电网中,窃电的影响很大,没有一个国家能彻底摆脱窃电事件的发生,唯一的区别在于不同国家窃电事件发生的频率可能不一样.窃电导致现有配电网过载,从而降低设备的预期寿命.由于供电不可靠和频繁的中断,导致真正的消费者受到影响.此外,这一问题在很大程度上影响了能源市场.引发窃电的原因有失业率上升、受教育水平不足、执法不力、反盗窃政策乏力等^[1-5].

很多学者对窃电问题展开了研究,其中主要的一个研究领域是关于打击电能表篡改.电能表篡改通过绕过中性点窃电、损坏电位线圈、使用射频波改变读数、使用机械冲击和电源终端互换来实现,这些通常在用户端现场可以观察到.目前,国内关于用电监察效率相关的研究主要集中在如何优化管理机制^[6-8].网络安全方面通过增强通信协议得到了改善,通信协议保护数据免受恶意网络攻击,这些恶意网络攻击旨在操纵和篡改发送给电力部门仪表软件的相关程序和读数^[9-10].

在偏远地区,窃电经常以窃取配电网线路上的电力的形式出现.很明显,这样的消费者没有通过电能表连接,窃电行为发生的地点随机,几乎不可能恢复损失并消除这种分接线路窃电的行为.陈雪、李刚等^[11-12]提出了基于多源信息融合的针对配电网规划及可视化的应用,但未能从原理上将该技术应用于窃电监测及管理;龙翩翩^[13]提出了基于多源信息融合的在线监测方法,该方法能够对潜在的窃电客户进行定位,方便用电排查,但是不能实时地对窃电行为进行精准打击,且窃电定位准确度未能进行有效的实验验证;Depuru S S R^[14]提出和设计了一种谐波发生器的结构,以防止盗窃行为,然而,这种方法还没有实用的设计,同时也不经济.

基于上述分析,本文提出一种配电网窃电监测与预防的方法,并通过实验证明了所提出的基于 EPPS 和 CSU 的防盗方案的适用性、操作灵活性和有效性.同时,在不中断电源、不知道配电网确切拓扑结构的情况下,准确控制打击实时场景中的防盗.

1 窃电研究与分析

1.1 窃电检测

图 1 为配电网的现有架构情况,其中 N 个真正的用户由配电变压器(DT)供电,电能表数据由数据采集系统收集,并通过广域网(WAN)与计量数据管理系统(MDMS)通信.具有 MDMS 的系统和数据中心验证能量平衡并计算电能分配损失百分比.非法用户 m 是指从配电网非法获取电力供应的消费者.

假设合法用户的电表测量的数据准确,将数据传输到系统控制站,并且用户没有违反合同的要求.在所提出的盗窃检测和预防方案中,能源表审计日志被用来检测物理和网络能源盗窃事件.集散控制系统在时间间隔 t 内收集向配电变压器供电的电能和 N 个用户接入所消耗的电能.技术损耗(TL)是负载电流的函数,因此,随着技术损耗的增加,电压调节能力变差.然而,非技术损耗(NTL)与配电网的电压

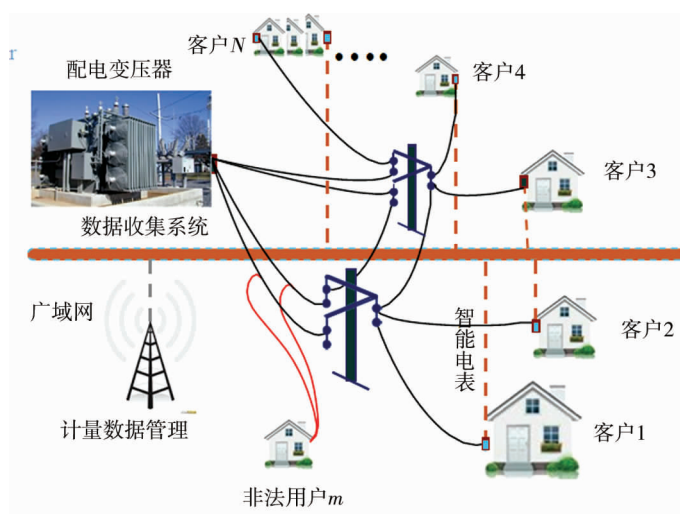


图 1 配电网现有方案

调节能力没有直接关系,在计算 NTL 之前,计算配电网的 TL 非常重要^[15].

1.2 无窃电时线路损耗计算

要识别电力盗窃,首先必须确定 TL.由于基础设施的原因,在任意两倍间隔 t 的分支线路 s 的实际电阻 r_s 未知.由于传输线与用户 i 之间存在电阻,测量 j 期间的欧姆损失为

$$L_{i,j} = \int_{t_{j-1}}^{t_j} [I_i(t)]^2 r_s dt. \quad (1)$$

式中: $L_{i,j}$ 为 j 期间因用户 i 造成的实际损耗; $I_i(t)$ 为瞬时电流.

当通过篡改或非法连接进行电力盗窃时,入侵者也会修改瞬时电流的测量值.实际上,所有瞬间测到的瞬时电流 $I_i(t)$ 是未知的,因此,假设电流大小和时间之间的关系是分段的、线性的,则有

$$\tilde{I}_i(t_j) = m_{i,j}t + I_i(t_{j-1}). \quad (2)$$

式中: $\tilde{I}_i(t_j)$ 为用户 i 在 j 期间内的瞬时电流估计值,时间范围为 $t_{j-1} < t < t_j$; $m_{i,j}$ 为坡度, $m_{i,j} = \frac{I_i(t_j) - I_i(t_{j-1})}{t_j - t_{j-1}}$; $I_i(t_j)$ 为用户 i 在 j 期间内的瞬时电流实际测量值; $I_i(t_{j-1})$ 为用户 i 在 $j-1$ 期间内的瞬时电流实际测量值.

把 I_i 代入式(1)中,那么在时间 $t_{j-1} \sim t_j$ 的配电网损耗为

$$\tilde{L}_{i,j}(t) = \frac{1}{m_{i,j}} \int_{I_i(t_{j-1})}^{I_i(t_j)} [(\tilde{I}_i(t))]^2 r_s dt. \quad (3)$$

将式(3)展开可得式(4)

$$\tilde{L}_{i,j}(t) = \frac{r_s}{3m_{i,j}} \{ [I_i(t_j)]^3 - [I_i(t_{j-1})]^3 \}. \quad (4)$$

通过电网节点与所有合法用户之间的功率平衡获得的所有分支(用户)在时间间隔 j 内的总技术损耗,如式(5)所示.

$$L_j = l_{no} + \sum_{i=1}^A \frac{r_s \{ [I_i(t_j)]^3 - [I_i(t_{j-1})]^3 \}}{3m_{i,j}}. \quad (5)$$

式中: L_j 为时间间隔 $t_{j-1} \sim t_j$ 内电网技术损耗总额; l_{no} 为总的非欧姆技术损耗; A 为安装在每个真正客户上的智能电表的数量.

1.3 计算线路电阻

为了准确地计算配电系统窃电检测时的线路电阻,采用奇异值分解法(SVD),以用户数据为基础对窃电进行检测.为了计算导线电阻,定义一个矩阵 \mathbf{H} ,每一行的数据代表 1 个样本数,每一列数据代表 1 个用户,样本数必须大于列数.要计算矩阵 \mathbf{H} 的 SVD,需要 3 个矩阵 $\boldsymbol{\psi}$, $\boldsymbol{\Sigma}$ 和 $\boldsymbol{\zeta}$ 的乘积,即^[16]

$$\mathbf{H} = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{\zeta}^T. \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\psi}$ 和 $\boldsymbol{\zeta}$ 为正交矩阵; $\boldsymbol{\Sigma}$ 为对角矩阵.

列向量 $\boldsymbol{\psi}$ 取自 $\mathbf{H}\mathbf{H}^T$ 的正交特征向量.从最大的特征值到最小的特征值,按从右到左的顺序排列^[17].为了执行 SVD,将形成一个包含以前用户数据样本的矩阵 \mathbf{H} ,如式(7)所示.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{[I_1(t_2)]^3 - [I_1(t_1)]^3}{3m_{1,2}} & \frac{[I_2(t_2)]^3 - [I_2(t_1)]^3}{3m_{2,2}} & \dots & \frac{[I_\beta(t_2)]^3 - [I_\beta(t_1)]^3}{3m_{\beta,2}} \\ \frac{[I_1(t_3)]^3 - [I_1(t_2)]^3}{3m_{1,3}} & \frac{[I_2(t_3)]^3 - [I_2(t_2)]^3}{3m_{2,3}} & \dots & \frac{[I_\beta(t_3)]^3 - [I_\beta(t_2)]^3}{3m_{\beta,3}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{[I_1(t_\theta)]^3 - [I_1(t_{\theta-1})]^3}{3m_{1,\theta}} & \frac{[I_2(t_\theta)]^3 - [I_2(t_{\theta-1})]^3}{3m_{2,\theta}} & \dots & \frac{[I_\beta(t_\theta)]^3 - [I_\beta(t_{\theta-1})]^3}{3m_{\beta,\theta}} \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{L} = [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_\theta]^T. \quad (8)$$

式中: \mathbf{L} 为配电网技术损耗的矢量形式; $L_1, L_2, \dots, L_\theta$ 为时间间隔为 $1, 2, \dots, \theta$ 内所有分支(用户)总的技术

损耗.

由式(7)和式(8)可得

$$\tilde{\mathbf{R}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{L}; \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{r}_1 \quad \tilde{r}_2 \quad \cdots \quad \tilde{r}_\beta \quad l_{\text{no}}]^T. \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{R}}$ 为线路电阻矢量形式; \tilde{r}_s 为分支线路 s 电阻的估计值.

为了测量得到分支线路的真实电阻,有不同的方法可以获得高精度的电阻值,例如,温度电阻传感器可用于测量 r_s , 其中 r_s 为分支线路 s 的电阻,即

$$r_s = r_0(1 + k(T - T_0)). \quad (11)$$

式中: r_0 和 T_0 为初始电阻和温度; k 为温度系数; T 为实时测量温度.

基于 r_0 和 T_0 , k 可以简化为

$$k = p_s T + q_s. \quad (12)$$

式中: p_s 和 q_s 为分支线路 s 的温度系数.

为了估计分支线路 s 的电阻,应确定 p_s 和 q_s 的值,式(12)将变为

$$\tilde{\mathbf{R}} = [p_1 \quad p_2 \quad \cdots \quad p_\beta \quad q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_\beta \quad l_{\text{no}}]^T. \quad (13)$$

1.4 窃电监测方案

一旦得到温度系数 p_s 和 q_s , 就可以提取所需的 TL 和 NTL, 时间间隔 j 的分支线路 s 的 TL 可表示为

$$\tilde{L}_{s,j}(t) = l_{\text{no}} + \frac{[I_s(t_j)]^3 - [I_s(t_{j-1})]^3}{3m_{s,j}} \frac{p_s T + q_s}{3m_{s,j}}. \quad (14)$$

通过非法分接,会增加一个额外的电流 $I_m(t_j)$, 则式(14)中的总电流为 $I_m(t_j) + I_s(t_j)$, 将产生的电压差为 $\Delta V_s \approx r_s [I_m(t_j) + I_s(t_j)]$, 分支线路 s 的电压差 $\Delta V_s = V_i - V_{i-1}$ 也将改变. 因此,分支线路 s 将是可能发生非法用电的地点,这将向 MDMS 提供指示,即该点配电网中发生非法分接窃电.

$$\tilde{L}_j = l_{\text{no}} + \sum_{s=1}^N \frac{\tilde{r}_s \{ [I_s(t_j)]^3 - [I_s(t_{j-1})]^3 \}}{3m_{s,j}}; \quad (15)$$

$$\tilde{L}_{\text{NTL},j} = L_j - \tilde{L}_j; \quad (16)$$

$$\tilde{L}_{\text{NTL},j} = L_j - l_{\text{no}} - \sum_{s=1}^N \frac{\tilde{r} \{ [I_s(t_j)]^3 - [I_s(t_{j-1})]^3 \}}{3m_{s,j}}. \quad (17)$$

式中: \tilde{L}_j 为时间间隔 j 内的总技术损耗估计值; $\tilde{L}_{\text{NTL},j}$ 为时间间隔 j 内的总非技术损耗估计值.

基于式(17),可以获得 EPPS 操作的阈值.如式(17)所示,配电损耗的百分比超过技术损耗百分比的估计值,这表明发生了能源盗窃.因此,将会从系统和控制中心发出控制信号来操作 EPPS.

2 EPPS 建模

2.1 不同类型的家用电器

EPPS 的电压范围根据式(18)的限制条件设计^[18].

$$\begin{cases} V_{\text{ov}} \leq 3 \text{ kV, 持续 } 1 \text{ min}; \\ V_{\text{min}} \leq V_{\text{APP}} \leq V_{\text{max}}. \end{cases} \quad (18)$$

式中: V_{ov} 为低压电网的工频耐受电压; V_{APP} 为家用电器的工作电压范围.

为了证明所提出的基于 EPPS 和 CSU 的防盗检测方案的灵活性和有效性,针对不同类型的家用电器,建立了由 EPPS 设计的电压范围的数学模型,家用电器根据负载类型分为 2 类.

2.1.1 带或不带开关电源(SMPS)的电阻负载

该组由具有电阻性质的家用电器组成.根据设备正常运行所需的电源类型,该组分为 2 类.

1) 电阻负载不带开关电源

这类包括白炽灯、LED、卤素灯和热水器.为了设计 EPPS 的电压范围,限制非法照明负荷的正常工作,

对钨丝灯进行了数学建模.钨丝灯的预期寿命取决于各种因素,如供电电压、温度、气压、使用小时数等^[19].在欠电压条件下,灯丝不会达到发光的温度,而过电压电源会导致钨丝蒸发.因此,增加电压将提高白炽灯的亮度,同时降低预期寿命.

2) SMPS 提供的电阻负载

一些由电子电路组成的电器需要使用 SMPS 装置来调节直流电源,如移动适配器、电视、CPU 和监控电容器,这些都被认为是 SMPS 中最薄弱的元件之一^[20].开关电源由带整流电路的输入级自愈式电解电容器和 LC 滤波电路的输出级自愈式电解电容器组成.在理想的 LC 电路中,电容器必须为交流电源提供低阻抗通路,并作为恒压源.然而,电压应力、热应力和纹波电流会降低其使用寿命.用等效串联电阻、 $\tan\delta$ 和漏电流计算电解电容器的劣化.当供电电压超过额定值时,电容降低,等效串联电阻增大,造成功率损耗,电容器芯温升高,电容器寿命缩短,在欠压情况下,开关电源不能正常工作.

2.1.2 带或不带稳压器的感性负载

该组由感性负载组成,根据对设备的过电压和欠电压供电条件的保护,分为 2 类.

1) 无稳压器的感性负载

此类负载包括电机负载,如吊扇、搅拌机、研磨机和泵.这些家用电器不与稳压器连接,在一定电压范围内有效工作.吊扇故障是由电气或机械故障引起的,电机绕组、三端双向可控硅或电容式调速电路存在电气故障,滚珠轴承损坏导致机械故障.

如果向电机提供低电压,转子转速会降低,因为产生的电扭矩与电压的平方成正比.因此,转速降低会导致转子电流的增加,从而产生足够的扭矩来驱动高惯性负载.因此,由于电机电流过大,绕组会过热.感应电动机的辅助绕组连接一个电容器,电容器的额定电压必须精心设计,使辅助绕组能够连续承受电容器电流.

如果发生过电压供电的情况,电容器两端的电压会增大,而等效电容会减小.随着电容的减小,等效串联电阻增大,导致电导率降低,电解质降解.因此,会导致电容器击穿,使得电容器发生灾难性故障,导致绝缘击穿或终端短路^[21].

2) 带稳压器的感性负载

这类负载包括家用负载,其价格昂贵且对电压频繁变化敏感,如冰箱和空调.这些装置与稳压器相连,以确保电压波动下的稳定供电,并通过将其与会发生欠电压或过电压供电线路进行隔离来保护电器设备.稳压器的主要部件是整流电路、电压传感电路、比较电路和由控制器和继电器组成的控制电路.CSU 设计并位于真正的客户场所,将电源调节到额定电压,从而为真正的用户提供不间断电源.

2.2 EPPS 和 CSU 电路设计

该方案是在系统限制条件下设计和运行的,如电器能承受的最小最大电压、施加电压的持续时间和低压电网的最大耐受电压.EPPS 和 CSU 是在实验室为单相 230 V, 50 Hz 供电系统开发的,以便于展示固态继电器(SRS)和双极双掷继电器(DPDTR)电源继电器的工作模式.电路设计可扩展到三相供电系统.整个方案由系统控制和数据控制中心组成,数据控制中心由带数字显示的微控制器单元实现.该微控制器实现了 SRS 和 DPDTR 的平滑切换,以运行基于配电网电压调节百分比(V.R)的不同子程序.这个在真正的客户场所应用的 CSU 与 EPPS 协同运行与控制,并由微控制器单元驱动.EPPS 由一台额定值为 230/400 V 的升压变压器组成,在二次侧(即 N_{1a} 和 N_{1b})具有抽头.通过它与额定值为 415/230 V 的配电变压器二次侧连接.CSU 由一次侧(N_{c2a} , N_{c2b} 和 N_{c2c})具有抽头的额定值为 800/230 V 的降压变压器组成,在智能电能表与 N 个真正的客户之间连接.

正常情况下,CSU 上出现的电压为

$$V_{c1} = V_{DT2}. \quad (19)$$

式中: V_{c1} 为 CSU 变压器的一次侧电压; V_{DT2} 为配电变压器(DT)的二次侧电压.

EPPS 和 CSU 的电路设计如图 2 所示,此时,EPPS 不工作,开关 SR2 和 SR1 处于关闭状态,所有其他电子继电器均处于打开状态(SR3, SR4, SR5, SR6 和 DPDTR).非法负载是通过非法连接牵引供电.根据

式(17),可以得到 EPPS 操作的阈值.系统数据和控制中心检测到窃电后,它根据配电网的 V.R 百分比启动 EPPS 和 CSU.通过在 EPPS 二次侧选择抽头从而能产生不同的电压(V_{E1} 或 V_{E2}).

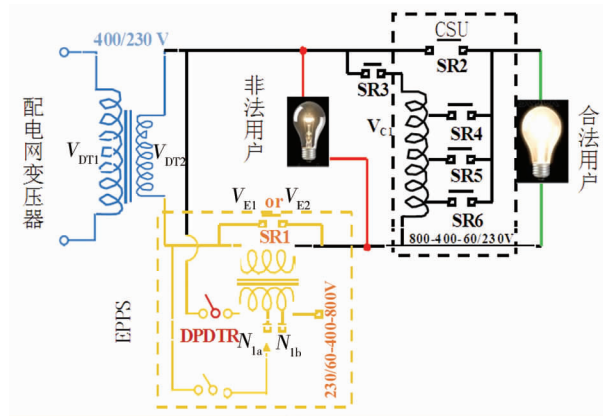


图2 EPPS 和 CSU 的电路设计

因此,CSU 一次侧出现的电压 V_{c1} 如式(20)所示.

$$V_{c1} = V_{DT2} \pm \frac{V_{E1}}{V_{E2}}. \quad (20)$$

式中: V_{E1} 和 V_{E2} 为由于改变二次侧抽头位置而出现在 EPPS 一次侧的电压.

因此, V_{E1} 和 V_{E2} 可表示为

$$\begin{cases} V_{E1} = V_{DT2} \frac{N_{E1}}{N_{E1a}}; \\ V_{E2} = V_{DT2} \frac{N_{E2}}{N_{E1a}}. \end{cases} \quad (21)$$

式中: N_{E1} 为二次侧 EPPS 部分变压器绕组匝数; N_{E1a} 为一次侧 EPPS 部分变压器绕组匝数; N_{E2} 为二次侧 EPPS 部分变压器绕组匝数(不同抽头位置).

如果 V.R 百分比很低,DPDTR 通过反向模式切换将 EPPS 与 DT 的二次端负极性连接,因此,CSU 一次侧的电压为

$$V_{c1} = V_{DT2} - V_{E1}. \quad (22)$$

把式(21)代入式(22)中可得

$$V_{c1} = V_{DT2} \left(1 - \frac{N_{E1}}{N_{E1a}}\right). \quad (23)$$

因此,可使非法用户处于欠电压工作状态,限制非法连接电器的运行.如果在电压调节正常或良好的情况下发生盗窃,为了在非法用户侧产生过电压状态,则 EPPS 通过将附加极性的分接头 N_{1a} 或 N_{1b} 与 DT 二次侧连接.通过连接 N_{1a} 及开关 SR3 和 SR5,在关闭状态下同时打开 SR1, SR2, SR4 和 SR6,能够在 CSU 一次侧产生的电压为

$$\begin{cases} V_{c1} = V_{DT2} + V_{E1}; \\ V_{c2} = V_{c1} \frac{N_{c2b}}{N_{c1}}. \end{cases} \quad (24)$$

式中: N_{c2b} 为二次侧 CSU 部分变压器绕组匝数; N_{c1} 为一次侧 CSU 部分变压器绕组匝数.

把式(21)代入式(24)中可得

$$V_{c1} = V_{DT2} \left(1 + \frac{N_{E1}}{N_{E1a}}\right); \quad (25)$$

$$V_{c2} = V_{DT2} \left(1 + \frac{N_{E1}}{N_{E1a}}\right) \frac{N_{c2b}}{N_{c1}}. \quad (26)$$

通过连接 N_{1b} 以及打开 SR3 和关闭 SR6 的同时,打开 SR1, SR2, SR4 和 SR5 就能够在 CSU 一次侧产生一个电压.CSU 与 EPPS 互相联锁并以降压模式运行,将电源电压调节至额定值,使真正的家用电器的运行性能更好.

$$\begin{cases} V_{c1} = V_{DT2} + V_{E2}; \\ V_{c2} = V_{c1} \frac{N_{c2c}}{N_{c1}}. \end{cases} \quad (27)$$

式中: N_{c2c} 为二次侧 CSU 部分对应的自耦变压器绕组匝数(不同开关状态对应不同绕组匝数).

把式(21)代入式(27)中得

$$V_{c1} = V_{DT2} \left(1 + \frac{N_{E2}}{N_{E1b}} \right). \quad (28)$$

那么合法客户的电压为

$$V_{c2} = V_{DT2} \left(1 + \frac{N_{E2}}{N_{E1b}} \right) \frac{N_{c2c}}{N_{c1}}. \quad (29)$$

2.3 提出的窃电算法

本文提出的防止窃电的算法流程如图 3 所示.图 3 提出了一种通过运行 EPPS 和 CSU 来防止配电网中窃电的算法,该算法分 3 个阶段运行.

2.3.1 设备分配和数据分析

为位于合法场所的智能电表分配客户 ID 号,以便通过 CSU 收集能源审计日志数据并与 MDMS 通信.DPDTR 和 SRS 的初始状态在系统和数据控制中心指定.通过利用双向广域网(GPRS 网络)收集的数据,用式(17)计算 $(t_0 - t_1)$ 的非技术损耗.

2.3.2 盗窃检测

开关设备的运行顺序如表 1 所示.如果式(17)的计算值大于 t_1 的阈值,则表示非法负载连接到服务线路.然后计算出配电的 V.R 百分比.配电网规定的 V.R(电压调节)百分比限值见文献[22].在被盗情况下,如果 V.R 值处于不良状态,则表示向用户提供的电压低于额定电压.因此,操作表 1 所示例程 1 是有益的,因为这将在非法负载上产生欠电压状态,并阻止负载正常工作.如果 V.R 值是好的或正常的,那么通过操作表 1 所示例程 2 或例程 3 中的开关设备,通过 EPPS 在非法消耗负载上创建过电压状态,使电器不能工作.即 V.R 百分比这一参数优化了 EPPS 和 CSU 的设计和成本,因此,可以使 EPPS 在不同的时间间隔内产生可变电电压供电状态.

2.3.3 防盗

在本次算法中,EPPS 和 CSU 基于 V.R 百分比的不同,参考表 1 运行在例程 1 或例程 2 或例程 3 的状态.在所有例程中,CSU 的运行都是为了在合法的用户负载上维持额定电压供应,在各例程完成后,恢复正常状态,如表 1 所示.

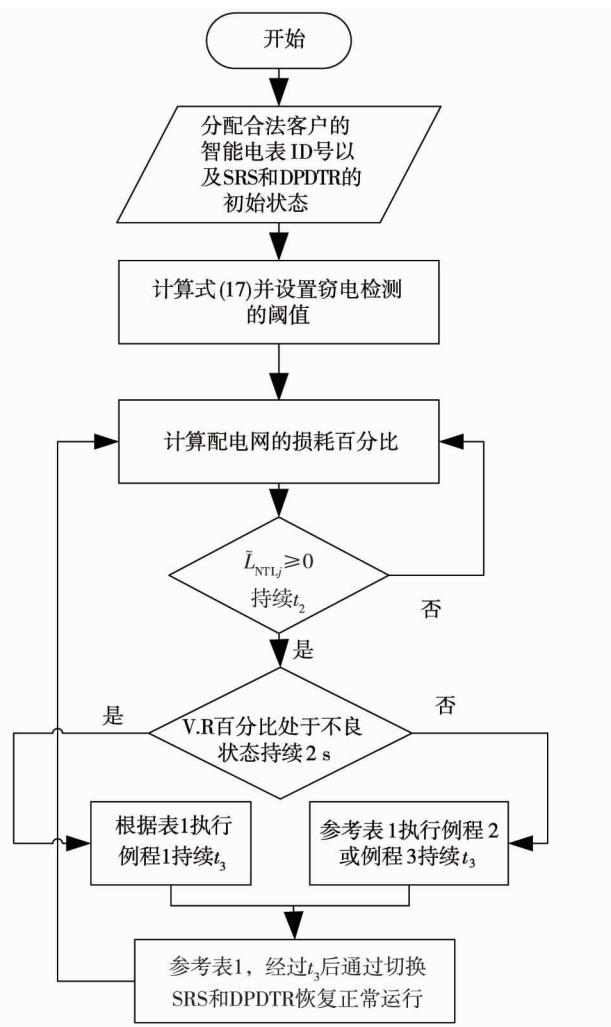


图 3 提出的防止窃电的算法

表 1 开关设备的运行顺序

开关	正常状态 ($t_0 - t_2$)	例程 1 ($t_2 - t_3$)	例程 2 ($t_2 - t_3$)	例程 3 ($t_2 - t_3$)
DPDTR	打开	关闭	关闭	关闭
SR1	关闭	打开	打开	打开
SR2	关闭	打开	打开	打开
SR3	打开	关闭	关闭	关闭
SR4	打开	关闭	打开	打开
SR5	打开	打开	关闭	打开
SR6	打开	打开	打开	关闭

3 硬件实现方法

提出的防盗方案除现有配电网中的智能计量基础设施外,还包括 EPPS, CSU, DPDTR, SRS 和微控制器单元.拟议方案的实验装置以实验室原型的形式开发,连接在配电网变压器和每个真正的客户场所之间.

实验装置分别测量提供给配电网变压器的能量和合法的客户消耗的能量.电能表数据通过 RS-485 通讯端口,借助 Modbus 协议与单片机进行通讯.由于式(17)的计算值大于 t_2 的阈值,EPPS 和 CSU 操作的子例程启动.图 4 为所提出的防盗方案的框图和具体实验设置.

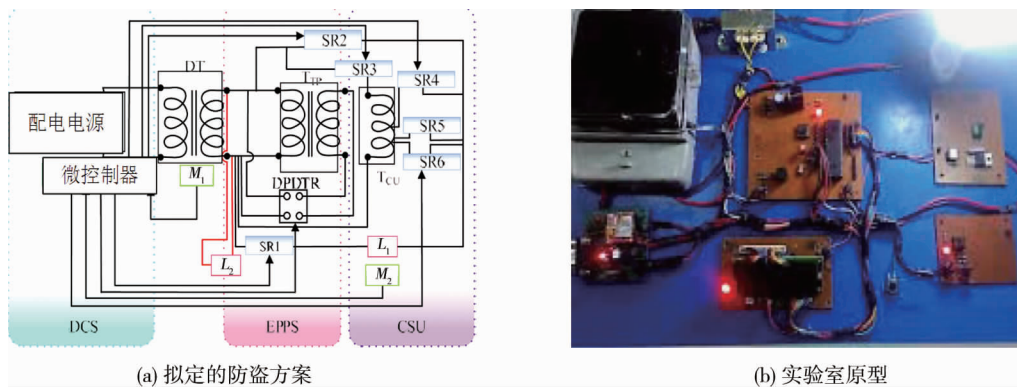


图 4 实验方案与接线

3.1 实验结果

实验结果如图 5 所示.供给配电网变压器的能量由能量计 M_1 测量,合法用户由 100 W, 230 V 白炽灯和电阻负载组成的配电网变压器二次电源供电.合法消费者 (C_1) 的能源消耗量由连接的电表 M_2 进行测量,另外,处于工作状态功率为 35 W 的一台风扇即非法负载 (L_2) 连接到线路上,这将导致能量损失增加超过设定值.例程 1 或例程 2 是通过电压调节运行的.图 5a 为没有发生窃电时的正常情况,因此,通过配电网变压器 V_{DT} 的电压为 230 V,而自耦变压器 V_{CU} 的电压为 229 V,EPPS 将不会运行.图 5b 显示了低于电压调节正常值的窃电事件,例程 1 将启动,因此, V_{DT} 为 230 V, V_{CU} 为 229 V,随后,EPPS 产生欠电压状态,以限制 L_2 (非法连接的设备) 的运行.图 5c 显示了正常的电压调节状态,例程 2 处于运行中.EPPS 在 L_2 上产生过电压,使得非法连接的设备不能工作.CSU 通过将电压调节到额定值来为合法的负载进行供电.

3.2 V.R 值对 EPPS 运行模式的影响

为了描述 EPPS 在不同的电压调节值和盗窃状态下的运行情况,在实验室对 EPPS 和 CSU 的原型进行了实验.这里,4 个耗电元件 ($B_1 = 5000$ W, $B_2 = 950$ W, $B_3 = 1\ 500$ W, $B_4 = 1\ 780$ W) 连接到 5 000 W 功率的配电网变压器上(表 2).

由表 2 可知:在正常情况下,当没有非法用户连接时,技术损耗 L_{TL} 的百分比为 1.6,电压调节 V.R 的百分比为 0.56.

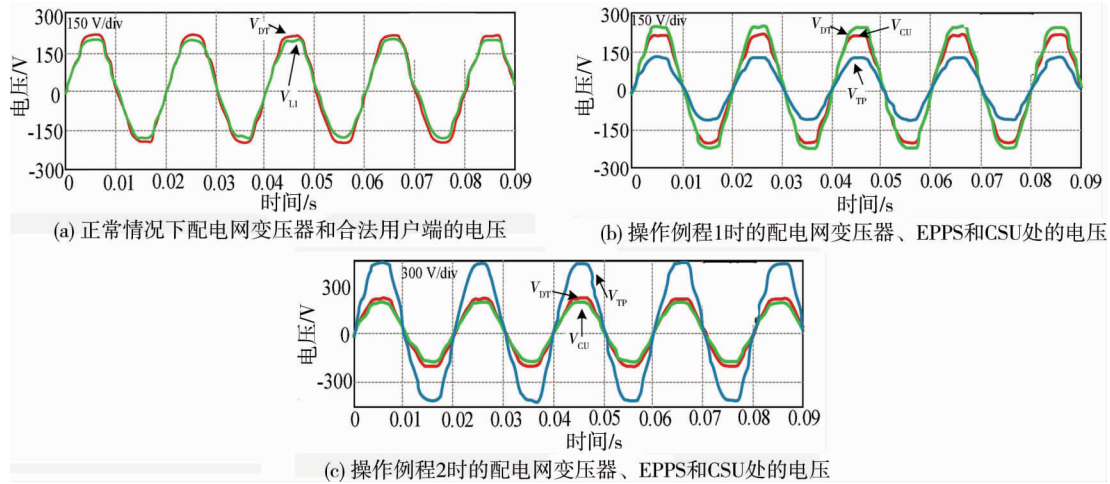


图5 实验结果

表2 所提出技术的实验性能

案例	B_1/W	B_2/W	B_3/W	B_4/W	总和/W	L_{TL} 百分比	V.R 百分比
正常状态	950	1 500	1 780	690	4 920	1.6	0.560
B_2 窃电	970	330	1 790	1 730	4 820	6.8	0.870
B_1 窃电	950	1 490	1 750	700	4 890	19.4	0.300
B_3 窃电	1 000	1 400	1 730	780	4 910	15.8	0.560
B_4 窃电	920	1 570	1 700	750	4 940	15.2	2.730
正常状态	970	1 500	1 780	1 000	5 250	-5.0	2.347

但是,如果任何用户超过需求并使配电网变压器过载,那么即使没有发生上一个案例中所示的盗窃事件,技术损耗 L_{TL} 的百分比的值为-5.0,电压调节百分比的值为2.347,即电压调节百分比的值也会变大.因此,很明显,电压调节百分比的值的改变并不表示发生了窃电事件.

EPPS 运行的实际结果及其对不同类型用电器的影响如表3所示.用于分析的家用电器是通过稳压器(D_1)、移动适配器(D_2)、风扇(D_3)和白炽灯(D_4)调节的冰箱或空调.针对 EPPS 的不同运行方式,阐述了输入电压对涉嫌盗窃的非法用电行为的影响.

表3 EPPS 模式对非法连接设备的影响

模式	电压/V	合法用户	非法用户	V.R	对负载影响
0	230	D_1, D_4	不适用	正常	无影响
1	60	D_1, D_3	D_4	欠电压	灯不亮
2	400	D_1, D_3	D_4	过电压(例程2)	灯丝晃动
1	60	D_1, D_3, D_4	D_2	欠电压	设备误操作
3	824	D_1, D_3, D_4	D_2	过电压(例程3)	电容击穿
1	60	D_2, D_4	D_1	欠电压	稳压器隔离设备
3	824	D_2, D_4	D_1	过电压(例程3)	稳压器隔离设备
1	60	D_1, D_2	D_3	欠电压	风扇转动缓慢,有噪音
3	824	D_1, D_2	D_3	过电压(例程3)	绝缘损坏

3.3 案例研究

通过案例分析所提出的防窃电方案的性能,为此目的而设计的实验室装置用于测试白炽灯、冷凝器调节风扇以及配备单相电源的移动适配器.以下案例研究说明了电压变化率对电气设备性能参数的影响.

3.3.1 白炽灯

将 40 W, 230 V 的白炽灯作为非法负载连接,以检查 EPPS 在灯丝上的电压产生的影响.图6为白炽灯参数相对于额定电压百分比变化的情况.在欠电压条件下,白炽灯泡每瓦辐射的流明非常低,因为灯丝

没有加热到一定的温度来辐射可见光.此外,在这种情况下,流过的电流和散发的热也较小.

在额定电压下,灯泡将发光并达到额定温度,在红外线波长范围内发光.在过电压条件下,热电阻开始缓慢下降,相反,电流迅速增加到 0.08 A,从而每瓦可以发射更多流明.因此,灯丝将在 0.05 s 内熔化或灯泡损坏.突然施加过电压将使灯丝失效的时间最少,这一现象在拟议的防盗方案中得到了验证.

3.3.2 风扇

电动机额定电压与相关参数的关系如图 7 所示.图 7 中评估了发动机性能参数对电压变化百分比的影响.电压变化会影响功率因数、寿命、效率、满载电流、起动电流和启动转矩.在欠电压情况下,电机会流入高满载电流以旋转吊扇,且旋转速度很慢,在旋转时也会产生噪音.在电压过高的情况下,与电风扇相连的调速电路和冷凝器的电流比额定值大,因此,三端双向可控硅电路或电容器不能工作,从而风扇的转速调节和起动受到影响,电机无法获得足够动力转动,或可能以极低的速度运行.

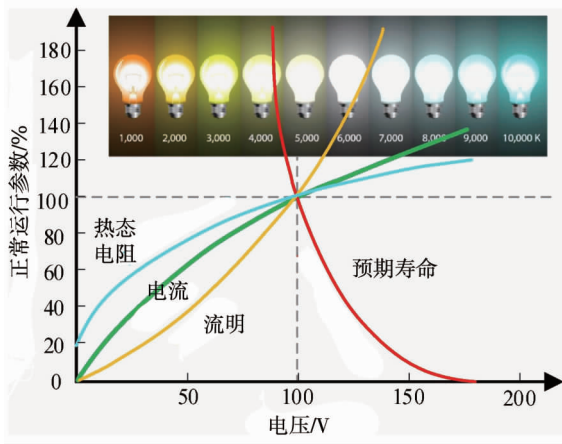


图 6 额定电压与额定参数关系

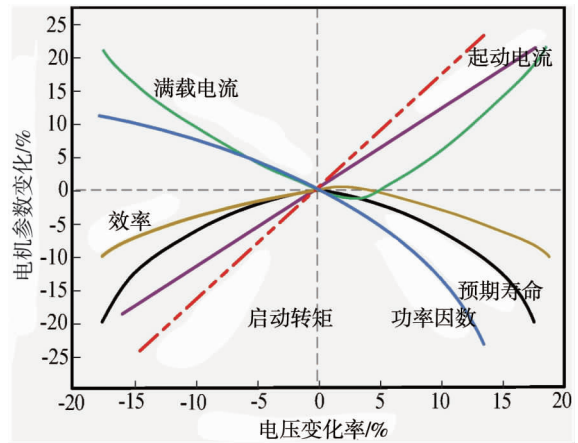


图 7 电动机额定电压与相关参数关系

3.3.3 基于 SMPS 的移动适配器

为了评估基于 SMPS 的移动适配器上 EPPS 的性能,选择了一个 5.5 V, 100 A 的适配器电路.SMPS 装置中最薄弱的元件是电解电容器,图 8 评估了电压变化百分比对电容器性能参数的影响,在过电压状态下,电容器的故障率随着漏电流和等效串联电阻的增大而增大,这会导致电容器击穿.在欠电压情况下,SMPS 装置不能给电容器充电,从而向作为负载连接的电池提供电流.

3.3.4 基于稳压器调节的冰箱

为了测试与冰箱相连的稳压器上 EPPS 的性能,选择了一个 AVR-53,将输出电压从 130 V 调节到 280 V.稳定器最薄弱的元件是半导体器件,如晶体管和二极管,图 9 评估了电压变化百分比对齐纳二极管参数的影响,对于过电压供电状态下,其击穿电压将降低.因此,齐纳二极管会过热和短路,以便通过将其与电源隔离来保护冰箱.

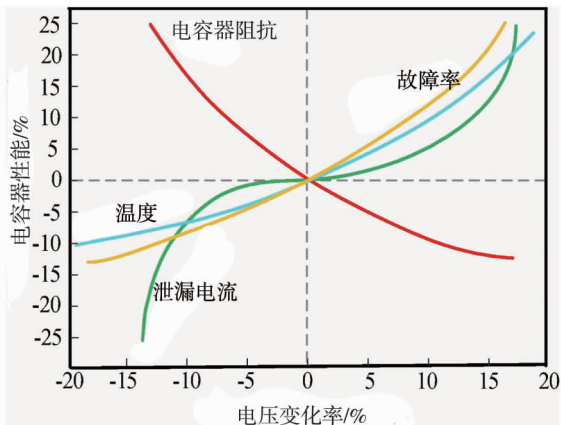


图 8 电解电容器额定电压与相关参数关系

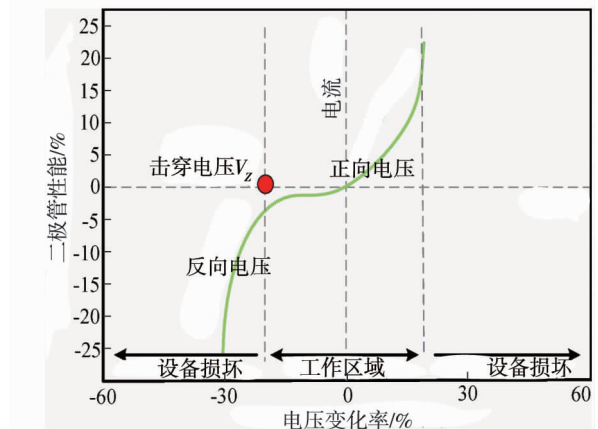


图 9 齐纳二极管额定电压与性能参数关系

4 结论

1) 本文提出了一种智能在线监测能源盗窃预防策略,设计了一种防窃电系统(EPPS),对各种器件的失效电压范围进行了研究,通过在不中断供电的情况下进行盗窃检测和预防。

2) 该系统能够实现对电压的稳定调节,有效地抑制配电网的非技术性损耗,避免因窃电导致配电网变压器的过载,通过向非法连接的负载提供不合适的电压来阻止窃电行为。

3) 实验中针对各种合法和非法负载,测试了所提出的防盗技术的有效性、适用性和灵活性。实验结果表明了所提方法的有效性。

参考文献:

- [1] Northeast Group. Emerging Markets Smart Grid: Outlook 2015[R]. Washington, D. C., 2014: 58-65.
- [2] 郁雁清.反窃电工作研究与对策[J].通讯世界,2019,26(6):290-291.
- [3] 王广义,林秀玉.用电监察中窃电与反窃电技术探讨[J].中国设备工程,2019(11):127-128.
- [4] Viegas J L, Esteves P R, Melicio R, et al. Solutions for detection of non-technical losses in the electricity grid: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 80:1256-1268.
- [5] Sahoo S, Nikovski D, Muso T, et al. Electricity theft detection using smart meter data[C]// IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). 2015:1-5.
- [6] 林艳霞.探讨供电企业开展用电检查管理工作的相关策略[J].中国新技术新产品,2012(10):231.
- [7] 栗秋华,卢雯嘉,陈瑜,等.市场经济环境下用电检查管理模式的探讨[C]//重庆市电机工程学会2010年学术会议论文集.2010:87-90.
- [8] 刘建平.供电企业如何有效开展用电检查管理工作的探讨[J].中国电力教育,2010(3):236-237.
- [9] Mohammad N, Barua A, Arafat M A. A smart prepaid energy metering system to control electricity theft [C]//2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC). IEEE, 2013:562-565.
- [10] Tan S, De D, Song W Z, et al. Survey of security advances in smart grid: a data driven approach First quarter[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017(1):397-422.
- [11] 陈雪,黄伟,叶琳浩,等.基于多源数据的配电网规划辅助决策系统研究[J].广东电力,2017,30(1):53-58.
- [12] 李刚,刘燕,宋雨,等.基于信息融合的电力大数据可视化预处理方法[J].广东电力,2016,29(12):10-14.
- [13] 龙翩翩,苏海林.一种基于多源信息融合的窃电行为在线监测方法[J].机电工程技术,2019(6):189-191.
- [14] Depuru S S S R, Wang L, Devabhaktuni V. Electricity theft: overview, issues, prevention and a smart meter based approach to control theft[J]. Energy Policy, 2011,39(2):1007-1015.
- [15] Tariq M, Poor H V. Electricity theft detection and localization in grid-tied microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(3):1920-1929.
- [16] 卢其威,王涛,李宗睿,等.基于小波变换和奇异值分解的串联电弧故障检测方法[J].电工技术学报,2017,32(17):208-217.
- [17] 戴华.矩阵论[M].北京:科学出版社,2001.
- [18] Abdi B, Ghasemi R, Mirtalaei S M M. The effect of electrolytic capacitors on SMPS's failure rate[J]. International Journal of Machine Learning and Computing, 2013,3(3):300-304.
- [19] Basu K. An interesting phenomenon lighting technology[J]. IEEE Potentials, 2003,22(2):39-40.
- [20] Tan S, De D, Song W Z, et al. Survey of security advances in smart grid: a data driven approach[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017,19(1):397-422.
- [21] Oh H, Azarian M H, Das D, et al. A critique of the ipc-9591 standard: Performance parameters for air moving devices[J]. IEEE Transactions on Device Materials Reliability, 2013,13(1):146-155.
- [22] Radi M A, Darwish M, Alqarni M. Voltage regulation considerations for the design of hybrid distribution transformers[C]//2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2014:1-6.