

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230545

考虑供用电双方无功补偿潜力的省级技术降损互动管控平台

张明慧¹, 张逸¹, 刘必杰², 敬昊元¹, 陈晶腾³

(1. 福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 国网宁德供电公司, 福建 宁德 352100;
3. 国网莆田供电公司, 福建 莆田 351100)

摘要: 当前的技术降损平台虽然在理论线损计算、无功优化和潮流调度优化等方面取得了一定成果, 但对供电方的无功补偿能力缺乏有效感知, 对用电方的无功补偿意愿缺乏精准引导。针对上述问题, 提出了考虑供用电双方无功补偿潜力的省级技术降损互动管控平台建设方案, 并提出了“低压无功补偿设备运行状态诊断”和“专变用户无功潜力挖掘”两个技术降损高级功能的设计与实施方案。前者可有效提高低压无功补偿设备的有效利用率、充分挖掘低压配电网的网损管理潜力。后者通过平台的信息共享与互动机制形成了协同治理、互利共赢的无功降损体系。目前, 所提平台已在某省电网投入实际应用。前者功能的验证准确率达到93.33%; 后者功能共梳理出707户目标用户, 并在平台机制的引导下逐步开展治理。

关键词: 技术降损平台; 低压无功补偿装置; 无功潜力挖掘; 功率因数

Provincial technology loss reduction interactive management and control platform considering reactive power compensation potential of power supply and consumption sides

ZHANG Minghui¹, ZHANG Yi¹, LIU Bijie², JING Haoyuan¹, CHEN Jingteng³

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Grid Ningde Power Supply Company, Ningde 352100, China; 3. State Grid Putian Power Supply Company, Putian 351100, China)

Abstract: Although the current technology loss reduction platform has achieved certain results in theoretical line loss calculation, reactive power and power flow scheduling optimization, it lacks effective perception of the reactive power compensation capability of the power supplier. It also lacks accurate guidance on the reactive power compensation willingness of the power consumer. In view of these problems, this paper puts forward a construction scheme of provincial technical loss reduction interactive management and control platform considering the potential of reactive power compensation of both power supply and demand sides. It also puts forward the design and implementation scheme of two technical loss reduction advanced functions of "operational state diagnosis of low voltage reactive power compensation equipment" and "special transformer user reactive power potential mining". The former can effectively improve the effective utilization rate of low-voltage reactive power compensation equipment and fully tap the network loss management potential of a low-voltage distribution network. The latter forms a collaborative governance, and a mutually beneficial and win-win reactive power loss reduction system through the information sharing and interaction mechanism of the platform. At present, the platform proposed in this paper has been put into practical application in a provincial power grid. The verification accuracy of the former function mentioned above is 93.33%. The latter has sorted out a total of 707 target users and gradually carried out treatment under the guidance of the platform mechanism.

This work is supported by the Science and Technology Guiding Project of Fujian Province (No. 2020H0009).

Key words: technical loss reduction platform; low-voltage var compensator; reactive potential mining; power factor

0 引言

配电网的网损率是供电企业综合反映电网规

划建设、生产运行的关键经济技术指标之一, 其高低直接影响到公司的生产经营状况与运营效率^[1-4]。为适应能源清洁低碳转型的深刻变革, 推动电力系统高质量、可持续发展, 有必要深入开展技术降损工作, 以进一步提高设备利用效率, 提升设备技术

基金项目: 福建省科技计划引导性项目资助(2020H0009)

性能,降低电力系统运行损耗,推动电网降本增效。

技术降损是指通过使用电力系统技术对线路及线路上的元件进行分析,有针对性地利用网络改造、设备更换等技术手段降低电量损耗^[5-9]。目前已有许多学者在电能损耗量化方法^[10-13]和技术降损策略^[14-18]等领域开展了大量的研究,为技术降损工作奠定了坚实的技术基础。同时,随着电网数字化的进程不断加快,产生了海量形式结构不同的数据^[19-20],这些数据全面反映了电网的运行环境与运行状态,为技术降损工作提供了数据支撑,因此,研发降损管控平台^[21-24]成为供电公司技术降损工作的下一步方向。目前国网公司已经建设了同期线损管理系统,实现了统计线损计算与理论线损计算等基础功能。此外,文献[21]介绍了一体化线损管理系统的集成与部署方案,该系统通过构建两级数据中心间的交换通道,使国网公司和省公司两级数据中心可以级联,然后通过省级ESB企业总线集成营销、调度、运检等专业系统的数据,基本实现了电量源头采集、线损自动生成的功能。文献[22]依托各专业系统的数据资源,利用线损计算模型在同期线损管理系统平台上实现了线损数据源头采集、线损自动计算等功能。文献[23]所提出的降损辅助决策平台基于无功电压趋优控制理论,实现了网损管理、模拟降损分析、辅助决策等应用。虽然目前技术降损相关平台的建设已取得了一定成果,但此类平台还存在两个主要不足。

1) 目前,绝大多数配电台区依照相关标准要求配置了低压无功补偿设备,以降低网损和保证电压质量^[24-27]。一方面,大多数设备仍为早期安装的机械式开关,无法采集和储存开关动作信息以及设备的电压、电流等运行数据。供电公司只能依靠定期现场排查来发现故障设备。另一方面,低压补偿设备分布广、数量大,且故障率、异常率高,低压台区运维人员水平参差不齐。传统人力排查手段费时、费力,使得精准、高效的低压无功运维工作难以开展,低压台区的线损水平愈加劣化。

2) 技术降损工作需要多方参与,许多专变用户的功率因数低,无功消耗量大,导致配电网无功损耗大,供电公司应当加强对用户的指导、强化督促职能,携手用户、无功治理方案商共同提高配网功率因数水平,减小配网无功损耗,但是现有技术降损平台的部署仅面向供电公司,多数用户对自身的无功需求不明确,也缺少途径获取相关技术支持,使得相关工作难以开展。

针对以上不足,本文提出一套考虑供用电双方无功补偿潜力的省级技术降损互动管控平台设计方案,并提出“低压无功补偿设备运行状态诊断”和

“专变用户无功潜力挖掘”两个技术降损高级功能的设计与实施方案,前者可有效提高低压无功补偿设备的有效利用率,充分挖掘电网的无功网损管理提升潜力,后者可联合无功治理方案提供商,为用户提供无功治理需求分析和治理效益评估一站式服务,供电公司降低配网无功损耗的同时帮助用户减少用电成本。目前,该平台部分功能已成功在某省级电网进行示范应用,取得了良好的效果。

1 功能需求与平台总体架构

满足供电公司、用户、无功治理方案商等各方的不同需求是设计技术降损管控平台的立足点与关键点。在技术降损工作中,供电公司的需求是:定位电网中的高损区域或元件、分析网损率异常、通过网络重构和无功优化等技术手段或加强设备管理水平等运维手段实现网损的降低;专变用户的需求是:提高用电能效、减少附加力率电费支出、寻求技术支撑以获得有效与经济的治理方案;无功治理方案商的需求是:挖掘用户与供电公司的无功治理需求、对接治理需求以便提供合适的治理方案及治理设备。

为满足以上业务需求,本文设计了如图1所示的省级技术降损管控平台架构。

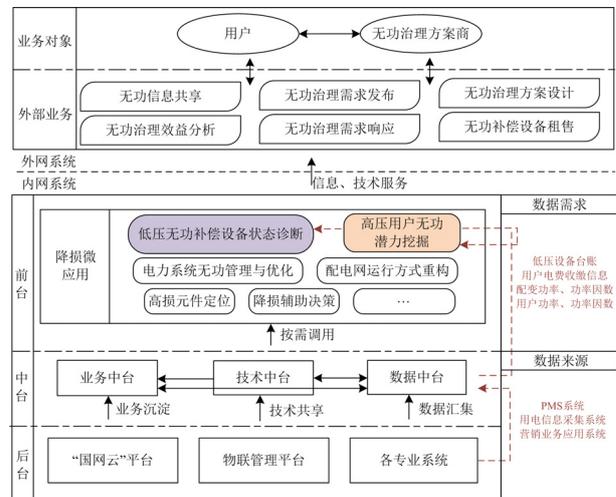


图1 平台总体架构

Fig. 1 Platform overall architecture

省级技术降损管控平台可以分为内网系统和外网系统。内网系统面向供电公司,基于“企业中台战略”开展建设^[28],以实现能力跨业务复用、数据全局共享,其架构由后台、中台、前台三部分构成,其中:1) 后台是整个系统的基础支撑平台,是一系列成熟业务系统的总和;2) 中台是整个系统的关键环节,可以为前台提供可复用的共享数据、技术、

业务,降低应用的开发难度和成本、避免前台应用的重复建设;3)前台是直接支撑供电公司业务开展的工具,对于技术降损管控平台而言,前台提供了支撑技术降损工作的高级应用,在技术降损工作方案的制定、治理效益的评价等方面为供电公司提供技术支持并给外网系统提供相关信息和技术服务。

外网系统主要面向用户和无功治理方案商,建立一个供电公司、用户和无功治理方案商互动的机制。供电公司将通过内网高级应用获得的用户无功信息(潜在无功需求、治理效益等)分享给用户,用户可以自愿在互动平台上发布自身无功信息和无功治理需求,此外,供电公司也可将电网无功改造的需求发布至平台上。无功治理方案商则可以对平台上的需求进行响应,提供定制化的治理方案和治理设备。通过平台的信息共享与互动机制可形成协同治理、互利共赢的无功降损体系。

2 低压无功补偿设备运行状态诊断技术

针对低压配电网的自动化和智能化水平较低、无法有效感知低压无功补偿装置运行状态、难以支撑低压台区技术降损工作的问题,本文提出了低压无功补偿设备运行状态诊断方法。该方法基于用电信息采集系统的配变功率相关数据,综合无功补偿设备的健康度和投切合格率来分析无功补偿设备运行的状态,为无功补偿设备的排查、检修计划提供了技术支持。

2.1 设备运行状态指标定义

2.1.1 无功补偿设备健康度定义

工程上一般用某一时刻配电变压器消耗的功率 $P + jQ$ 作为描述电力负荷的数学模型,该时刻的功率因数计算公式为

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (1)$$

式中: P 和 Q 分别为配变的自然有功功率和自然无功功率; $\cos \varphi$ 为配变的自然功率因数, φ 为功率因数角。在无功补偿设备未投入运行或未安装无功补偿设备的情况下,自然功率因数在某一微小时刻的变化 $d \cos \varphi$ 与负荷的关系由式(2)描述。

$$d \cos \varphi = \left[\frac{1}{\sqrt{P^2 + Q^2}} - \frac{P^2}{(P^2 + Q^2)^{3/2}} \right] dP - \frac{PQ}{(P^2 + Q^2)^{3/2}} dQ = \frac{Q^2}{(P^2 + Q^2)^{3/2}} dP - \frac{PQ}{(P^2 + Q^2)^{3/2}} dQ = \frac{Q}{(P^2 + Q^2)^{3/2}} [QdP - Pd(Q - Q_c)] \quad (2)$$

式中: Q_c 为无功补偿容量; dP 与 dQ 分别为自然有功功率与自然无功功率的变化量。

将 $QdP - PdQ$ 定义为自然变化因子。若配电变压器的无功补偿设备正常投入运行,则采集到的功率因数和无功功率为“补偿后”功率因数和“补偿后”无功功率。若因前一时刻的状态导致无功补偿设备在后一时刻投入或切除,则自然变化因子分别修正为 $QdP - Pd(Q - Q_c)$ 和 $QdP - Pd(Q + Q_c)$ 。

由上述分析可知,无功补偿设备会通过自然变化因子的修正,影响功率因数曲线的变化趋势,从而使日功率因数在投切时刻不能随着有功功率自然变化,从而降低了功率因数和有功功率的自然相关性。由于功率因数和有功功率之间的函数关系是非线性的,故本文采用互信息(mutual information, MI)对功率因数和有功功率的非线性相关程度进行度量,考虑一组对应的有功功率序列 X 和功率因数序列 Y ,其互信息计算公式^[29]为

$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (3)$$

式中: $H(X)$ 和 $H(Y)$ 分别为序列 X 和 Y 的信息熵, $H(X, Y)$ 为序列 X 和 Y 的联合熵。互信息值越大,则相关性越强。

实际电网运行经验表明,由于地理位置、产业结构等诸多因素不同,其典型负荷类型也存在差异,进而导致各配变的日负荷曲线亦不同,有功功率和功率因数的相关性程度存在差异,因此需要对配变的日负荷曲线进行聚类分析,找出同类型负荷的配变,然后在此基础上分析无功补偿装置的状态。

本文采用 k-means 聚类算法对同一地区的配变日负荷曲线进行聚类,用戴维森堡丁指数(Davies-Bouldin index, DBI)确定聚类簇数^[30]。聚类并归一化后的各聚类中心配变的日负荷曲线矩阵为

$$P_i^n = \begin{bmatrix} P_i^1 \\ P_i^2 \\ \vdots \\ P_i^N \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, P_i^n 为第 i 天的第 n 类聚类中心配变的日负荷曲线矩阵,考虑到配变的数据采样间隔为 15 min, P_i^N 通常为 1×96 的行向量。

记第 i 天中第 k 台配变的日功率因数曲线为 c_{ik}^n ,属于第 n 类且同样为 1×96 的行向量。依次计算 c_{ik}^n 与 P_i^n 的互信息,便可得到互信息矩阵为

$$M_{ik} = \begin{bmatrix} m_{i1} \\ m_{i2} \\ \vdots \\ m_{iK} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: m_{ik} 为第 i 天第 k 台配变的日功率因数曲线与相应类别聚类中心配变日负荷曲线的互信息; K 为配变总台数。

引入可靠系数 λ_{ik} , 如式(6)所示。

$$\lambda_{ik} = \cos \varphi_{ik}^{\text{av}} \quad (6)$$

式中, φ_{ik}^{av} 为第 i 天的第 k 台配变的日平均功率因数角。该系数指的是第 i 天第 k 台配变的日平均功率因数, 若可靠系数非常低, 以至于其对自然变化关系的扭曲超过了无功补偿设备, 说明当天的功率因数存在异常, 这台设备也应当列入排查计划。

通过上述分析可知, 若配变的功率因数与有功功率的相关程度高, 代表配变功率因数越接近自然功率因数, 无功补偿设备进行投切的动作时刻少, 静止状态时刻多。若在功率因数不达标的情况下, 该配变的无功补偿装置损坏的概率越高。因此, 综合考虑日平均功率因数和互信息来判断设备的健康程度, 为了便于分析, 将互信息转化为正向型指标, 并定义配变无功补偿设备的健康度矩阵为

$$\mathbf{H}_{ik} = \begin{bmatrix} h_{i1} \\ h_{i2} \\ \vdots \\ h_{ik} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h_{ik} = \frac{\lambda_{ik}}{m_{ik}} \quad (8)$$

式中, h_{ik} 为第 i 天第 k 台配变的设备健康度。考虑到仅对某天的数据进行分析可能会出现聚类错误等偶然性因素, 并且配变用户的数据具有周期性和偶然的离群特征, 本文采用一段时间跨度内的日健康度平均值 h 作为无功补偿设备健康状况的度量。

2.1.2 无功补偿设备投切合格率定义

由于部分地区早期安装的机械式开关电容器组仍处在服役阶段, 其运行数据不包括无功补偿设备的投切动作记录, 因此需要采用计算方法对无功补偿设备的日投切动作进行判定。

1) 低压无功补偿装置的实际投切判据

根据负荷特性, 常规电力负荷的有功分量一般远大于无功分量, 在非故障情况下, 功率因数的波动不会十分剧烈。实际上, 无功补偿设备的投入运行会对功率因数进行修正, 其修正的幅度要大于功率因数自然变化的幅度。

设采样时刻 t_1 检测到的有功功率、无功功率以及功率因数的实际值分别为 P_1 、 Q_1 、 $\cos \varphi_1$, 下一个采样时刻 t_2 的实际值分别为 P_2 、 Q_2 、 $\cos \varphi_2$, 定义:

$$Q'_2 = P_2 \times \tan(\arccos(\cos \varphi_1)) \quad (9)$$

式中, Q'_2 为 t_2 时刻的自然无功功率。如果 t_2 时刻由于无功补偿设备的投切动作导致功率因数与前一时刻产生较大的变化, 此时由 $\cos \varphi_1$ 计算得出的自然值就会较实际值发生变异, 定义 ΔQ 为 t_2 时刻无功功率的变异值, 如式(10)所示。

$$\Delta Q = Q_2 - Q'_2 \quad (10)$$

由于无功补偿设备对功率因数的修正幅度一般大于无补偿设备时的自然变化幅度, 故加入变异值的阈值条件作为无功补偿设备的实际投切动作判据。设备动作时, 其变异值的大小满足大于电容器组投切容量的最小值 $Q_{c,\min}$ 。据此, 提出无功补偿设备的实际投切判据, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} \text{设备投入} & \Delta Q \leq -Q_{c,\min} \\ \text{设备不动作} & -Q_{c,\min} < \Delta Q < Q_{c,\min} \\ \text{设备切除} & \Delta Q \geq Q_{c,\min} \end{cases} \quad (11)$$

2) 低压无功补偿装置的理想投切判据

结合设备出厂设定和无功电压运行导则要求, 分析在特定时刻设备是否应该投切, 作为判断设备投切动作的参照。设采样时刻 t 运行数据为 P 、 Q 、 $\cos \varphi$, 根据前一时刻数据, 计算得到无功功率自然值, 设出厂设置的功率因数补偿下限为 $\cos \varphi_{\text{LSL}}$, 上限为 $\cos \varphi_{\text{USL}}$ 。提出设备理想投切动作判据, 作为设备投切动作参照标准, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} \cos \varphi < \cos \varphi_{\text{LSL}} \ \& \ \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q' - \min Q_c)^2}} \leq \cos \varphi_{\text{USL}} \\ \text{设备应投入} \\ \cos \varphi > \cos \varphi_{\text{USL}} \ \& \ \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q' + \min Q_c)^2}} \geq \cos \varphi_{\text{LSL}} \\ \text{设备应切除} \\ \text{else} \ \text{设备不应动作} \end{cases} \quad (12)$$

综合功率因数越限条件、投切有效判断条件, 提出设备理想投切动作判据。其中, 功率因数越限条件保证了当监测到无功功率不合格的情况时, 设备应该动作; 投切有效条件则保证了投切动作的有效性, 若补偿最小容量后的功率因数存在越上限情况, 则不应投入。同理, 若切除最小容量电容器后的功率因数将会越下限, 则不应切除。

进一步地, 为了对无功补偿设备的投切动作进行评估, 需要将其量化。根据式(11)和式(12)分别计算第 k 台配变在某时刻的实际投切情况和理想投切情况, 若动作一致, 则认为该时刻投切动作合格, 反之不合格。则定义配变的投切合格率为

$$s = \frac{\text{投切合格时刻总数}}{\text{采样时刻总数}} \times 100\% \quad (13)$$

2.2 设备运行状态诊断方法

针对设备健康度指标，采用箱线图分析中常用的 Whisker 下限作为异常检测的阈值^[31]；针对投切合格率指标，考虑到投切合格率是投切动作表现的直接量化，故设置异常阈值为其均值。

根据设备指标得分和阈值的关系，可将设备的运行状态分为如下 3 种状况：

- 1) 若这两个指标均小于阈值，则认定该无功补偿设备故障，列入“急需排查”状态；
- 2) 若任意指标小于阈值，则认定该无功补偿设备健康，但该设备需列入“计划排查”状态，排查顺序可按照评分的高低确定，如果是设备健康度低于阈值，则需要对其设备本体进行运行维护，如果是投切合格率低于阈值，则需要对其投切策略进行调整；
- 3) 若两个指标均大于阈值，则认定该无功补偿设备健康，列入“无须排查”状态。

3 专变用户无功潜力挖掘技术

专变用户一般是所在地区的用电大户，其功率因数水平大多较低，因此需要向电网吸收大量无功功率，由此造成的网损不可小觑。同时，用户还需因功率因数不达标而缴纳功率因数调整电费。挖掘出专变用户的无功需求，并积极引导用户开展无功治理，不仅能够减少网损，还能节约用户的生产成本。针对该问题，本文提出了一种用户无功潜力挖掘方法，该方法通过挖掘用户用电数据，计算用户的无功补偿需求容量，并估计治理效益及成本回收周期，以指导用户的无功治理工作。

3.1 基于净现值分析的用户无功潜力挖掘方法

从用电信息采集系统中可以获取专变用户的有功/无功功率曲线和功率因数曲线，从营销业务应用中可以获取用户的电费收缴信息，本文基于上述数据估计用户安装无功补偿装置后的力率电费减少量。

取专变用户的上月历史数据，其中记其平均有功功率数据为 $P^{\text{avg}} = \{p_1, p_2, \dots, p_t\}$ ， p_t 为 t 时刻的有功功率监测值；平均无功功率数据为 $Q_{\text{aft}}^{\text{avg}} = \{q_{c1}, q_{c2}, \dots, q_{ct}\}$ ， q_{ct} 为 t 时刻补偿后的无功功率监测值；基本电费为 C_B ；电度电费为 C_p ；力率电费为 C_Q ；月平均力率为 Y 。除电费外，其余数据的数据间隔为 15 min^[32]。设安装的无功补偿装置最大补偿量为 Q_c ，按照恒功率因数模式进行补偿(功率因数目标值为 0.95)，假设无功补偿不影响用户的有功功率，

则补偿后的无功功率数据为

$$q_{ct} = \begin{cases} q_t - Q_c, & \text{if } \frac{p_t}{\sqrt{(q_t - Q_c)^2 + p_t^2}} < 0.95 \\ \frac{p_t}{0.95} \times \sin(\arccos(0.95)), & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

补偿后的月平均力率 Y_{aft} 为

$$Y_{\text{aft}} = \frac{\sum_{t=1}^T (\Delta T \times p_t)}{\sqrt{\left[\sum_{t=1}^T (\Delta T \times p_t)\right]^2 + \left[\sum_{t=1}^T (\Delta T \times q_{ct})\right]^2}} \quad (15)$$

式中： q_t 为 t 时刻补偿前的无功功率监测值； ΔT 为数据间隔，取 900 s。通过查找《功率因数调整电费办法》中的功率因数调整电费表即可获取对应的补偿前后的罚款百分比，分别记为 α_{bef} 和 α_{aft} 。则无功补偿后该月力率电费减少量约为

$$\Delta C = (C_p + C_B) \times (\alpha_{\text{bef}} - \alpha_{\text{aft}}) \quad (16)$$

在估算出用户无功补偿后力率电费的减少量之后，进一步分析其治理效益。取用户过去 M 个月的月力率电费减少量均值为月均治理效益，记为 C^1 ，即

$$C^1 = \frac{\sum_{m=1}^M \Delta C(m)}{M} \quad (17)$$

式中， $\Delta C(m)$ 为第 m 个月的月力率电费减少量。

本文采用净现值法估算治理效益，净现值 N_{pv} 的计算公式为

$$N_{\text{pv}} = \sum_{m=2}^{M_E} (C^1 - C_{M_E}^0)(1+g)^{-m} - \frac{C_{\text{mi}}^0}{1+g} \quad (18)$$

式中： M_E 为设备使用寿命，一般为 5 年； $C_{M_E}^0$ 为设备月维护成本，一般为设备价格的 1%； g 为基准折现率，即可接受的投资项目最低标准的收益水平，一般取 8%； C_{mi}^0 为设备初始投资成本。设备相关参数取值参考不同无功治理方案商给出的方案，取各方案商所给出的不同方案的均值。

本文以净现值最大为优化目标，通过粒子群算法^[33-34]求解 Q_c 作为用户的无功补偿需求容量。确定 Q_c 之后，即可确定用户的动态投资回收周期 T_p ，其值为满足等式(19)的最小正数。

$$0 < \sum_{m=2}^{T_p} (C^1 - C_{M_E}^0)(1+g)^{-m} - \frac{C_{\text{mi}}^0}{1+g} \quad (19)$$

3.2 无功信息共享及三方互动机制

平台所构建的无功信息共享及三方互动机制所形成的跨职能流程如图 2 所示。

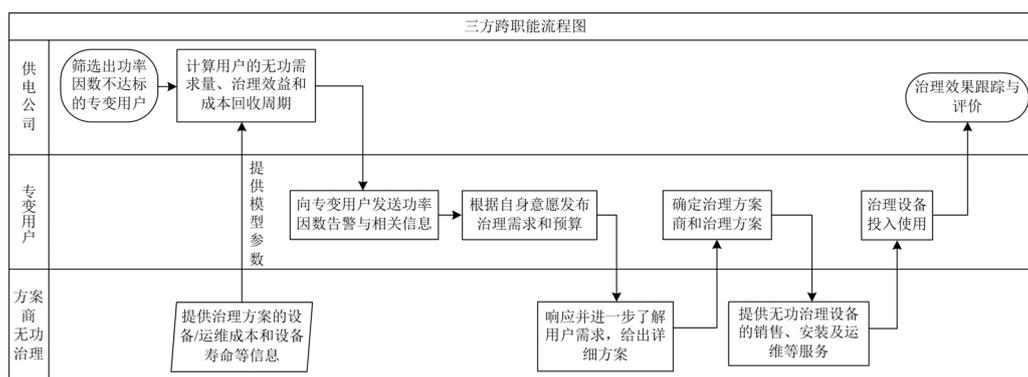


图 2 无功信息共享及三方互动机制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reactive power information sharing and tripartite interaction mechanism

在上述机制中，供电公司通过挖掘专变用户的用电数据，通过短信的方式对功率因数不合格的用户进行告警，然后向用户推送其无功需求量、治理效益和成本回收周期，最后在用户开展无功治理后，反馈其无功治理效果。同时，邀请符合标准的可靠无功治理方案商入驻平台，在整个机制中发挥着牵头、指导和协调的作用；专变用户可以根据自身电费缴纳情况和估算出的治理效益等信息，决定是否开展无功治理。若需要开展无功治理，可在平台上发布治理需求和预算，并根据入驻的无功治理方案商所提供的治理方案开展定制化治理。无功治理方案商一方面可以响应用户的治理需求，进一步接洽治理方案事宜并提供治理设备的销售、安装和运维等服务；另一方面，还可以向供电公司提供典型治理案例、治理设备的技术性能和费用等信息，帮助供电公司完善无功潜力挖掘模型。通过平台的无功信息共享及三方互动机制可形成协同治理、互利共赢的无功降损体系。

4 平台功能实例分析

4.1 低压无功补偿设备运行状态诊断实例分析

以福建省莆田市共计 10 564 台数据采集情况良好的配变为例，获取其 23 天的三相有功功率、无功功率、三相功率因数数据(数据间隔为 15 min，一天 96 个数据点)，用上述数据对本文提出的低压无功补偿设备运行状态诊断方法进行验证。

依次计算数据时间段内各配变的设备健康度 h 和投切合格率 s ，其统计指标如表 1 所示。

从表 1 可以看出，莆田地区低压无功补偿装置的设备健康度情况较为集中，75%的装置评分在 0.846 以上。而投切合格率的差异较大，投切合格率较高的装置评分集中在 0.909 至 1 之间，而投切合格率较低的台区则分散在 0 至 0.615 之间。指标的异常判断阈值如表 2 所示。

表 1 无功补偿设备运行状态统计指标

Table 1 Statistical indicators of operation state of reactive power compensation equipment

运行状态指标	最小值	最大值	平均值	中位数	上四分位	下四分位
h	0	1	0.846	0.855	0.862	0.846
s	0	1	0.762	0.909	0.988	0.615

表 2 指标的阈值

Table 2 Threshold value of indicator

运行状态指标	阈值
h	0.822
s	0.762

根据实际运行维护的随机排查结果，对统计分析的结果进行检验。排查样本包括：10 台排查表显示正常运行的低压无功补偿设备和 5 台排查表显示有故障的设备。所排查设备的分析情况如表 3 所示。

表 3 所排查设备的分析情况

Table 3 Analysis of equipment under investigation

设备序号	h	s	诊断分析		诊断结果
			(正常√, 异常×)		
			h	s	
健康设备 1	0.885	0.816	√	×	健康
健康设备 2	0.829	0.194	√	×	健康
健康设备 3	0.835	0.548	√	×	健康
健康设备 4	0.859	0.646	√	×	健康
健康设备 5	0.845	0.552	√	×	健康
健康设备 6	0.861	0.725	√	×	健康
健康设备 7	0.863	0.966	√	√	健康
健康设备 8	0.866	0.485	√	×	健康
健康设备 9	0.792	0.591	×	×	故障
健康设备 10	0.867	0.973	√	√	健康
故障设备 1	0.783	0.162	×	×	故障
故障设备 2	0.805	0.188	×	×	故障
故障设备 3	0.811	0.349	×	×	故障
故障设备 4	0.794	0.645	×	×	故障
故障设备 5	0.716	0.145	×	×	故障

从表 3 可以看出,本文方法对 14 台低压无功补偿装置的运行状态均判断正确,仅将健康设备 9 误判成故障设备,通过表 4 的混淆矩阵可以得出,本文方法的准确率达到了 93.33%,说明了本文方法所给出的结果有一定的参考价值,能够在缺乏无功补偿装置投切动作记录的情况下,通过挖掘配变用采数据筛选出异常无功补偿装置,提高了运维效率、减少了运维成本。

表 4 无功补偿设备运行状态诊断结果的混淆矩阵

Table 4 Confusion matrix of diagnosis results of operation state of reactive power compensation equipment

		排查结果	
		正常	异常
诊断结果	正常	9	0
	异常	1	5

基于上述方法,在莆田市的 10 564 台低压无功补偿装置中,筛选出了“急需排查”的 88 台故障设备,2554 台“计划排查”的健康设备。

4.2 专变用户无功潜力挖掘实例分析

以福建省莆田市某混凝土生产企业为例,其协议容量为 1800 kVA,某月份的有功功率曲线、无功功率曲线和功率因数曲线分别如图 3—图 5 所示。

基于附录 A 表 A1 该月代理购电工商业用户电价表,该企业当月的电费收缴信息如表 5 所示。采取本文的无功潜力挖掘方法,可以给出该企业采取无功治理后能获得的收益,具体如表 6 所示。

可以看出,若该用户进行无功治理,则可以避免因功率因数不足产生的额外电费支出,极大地降低了企业的用电成本,能够促进企业进一步节约能源、降碳减排、绿色发展。

目前,该功能模块在福建莆田市供电公司开展试运行,共梳理出 707 户目标客户,并通过短信

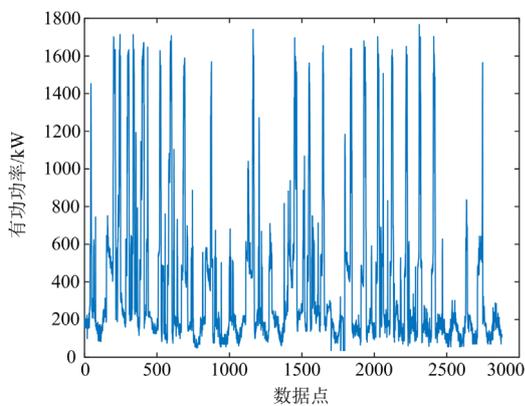


图 3 有功功率曲线

Fig. 3 Curve of active power

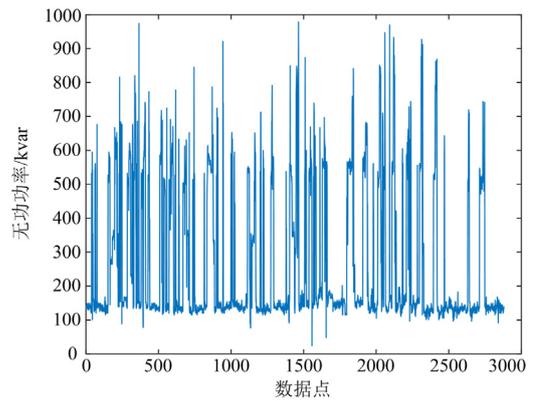


图 4 无功功率曲线

Fig. 4 Curve of reactive power

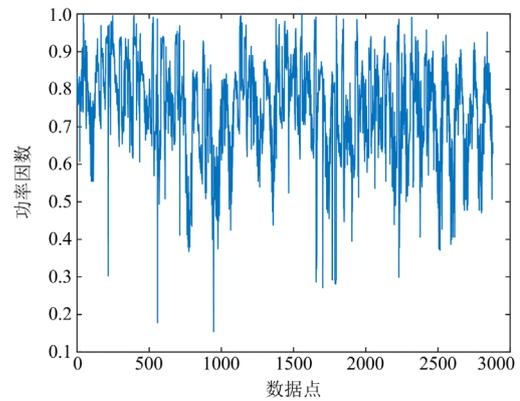


图 5 功率因数曲线

Fig. 5 Curve of power factor

表 5 电费收缴信息

Table 5 Information of electricity fee

电度 电费/ 万元	基本 电费/ 万元	参与功率因 数调整电费/ 万元	月平 均力 率	调整 系数/ %	力率 电费/ 万元	合计 电费/ 万元
14.66	4.10	18.76	0.81	4.5	0.84	19.60

表 6 无功潜力兑现价值

Table 6 Profit of reactive potential realization

补偿容 量/kvar	补偿后月 平均力率	无功补偿单位 价格/(元·kvar)	净现值/ 万元	成本回收 周期/月
88	0.9	300	6.92	6

的方式对用户的无功情况进行告知,已有大量专变用户在供电公司指导和协调下积极与无功治理方案商洽谈治理措施,并已逐步实施无功治理,取得了良好的治理效果。若目标用户全部开展治理,预计总计的年治理收益折算为电量可达 12 415 万 kWh,节省用户用电成本近 3000 万元,其平均成本回收周期约为 38 个月^[35-36]。附录 A 图 A1 为该功能的界面展示。

5 结语

本文提出一种考虑供用电双方无功补偿潜力的省级技术降损互动管控平台,并在某省级电网进行应用,得到结论如下:

1) 所提技术降损方案不新建系统,而是基于现存成熟的数据、系统与业务开发应用,不增加系统运维压力与建设困难,有效利用现有系统资源。

2) 在电网侧,平台不新增监测设备和通信投资,实现了对无功资源的有效挖掘,高效利用配电网存量无功补偿设备。

3) 在用户侧,提出三方参与的互动机制,助力网损降低的同时,减少用户用电成本、开拓无功治理市场。

未来平台将继续强化多方互动机制,并为供电公司的技术降损工作提供进一步精细化、精准化的数据支撑。

附录 A

表 A1 该月的代理购电工商业用户电价表

Table A1 Electricity price table for commercial users purchasing electricians as agents for the month

分时电度用电价格/(元/kWh)				容量	变压器
尖峰时段	高峰时段	平时段	低谷时段	电费/(元/kWh·月)	
0.947 008 75	0.859 408 75	0.596 387 5	0.333 328 75	22.8	

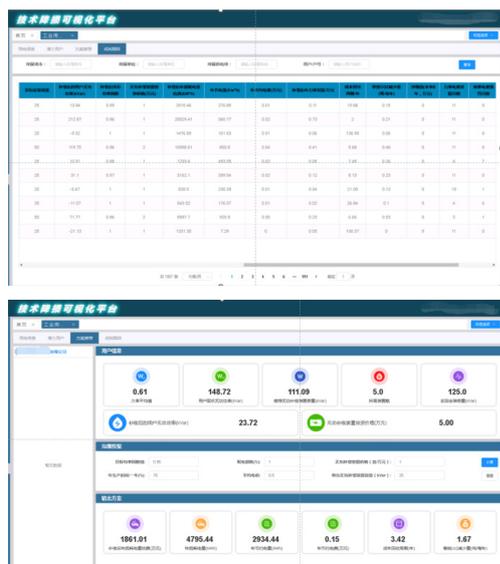


图 A1 专变用户无功潜力挖掘部分界面展示

Fig. A1 Display of interface for exploring reactive power potential of high-voltage users

参考文献

- [1] 李滨, 严康, 罗发, 等. 最优标杆在市级电网企业线损精益管理中的综合应用[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 184-191.
LI Bin, YAN Kang, LUO Fa, et al. Comprehensive application of optimal benchmarking in line loss lean management of city-level power grid enterprises[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 184-191.
- [2] 杨建华, 肖达强, 张伟, 等. 基于改进 RBFNN 的 1000 kV 特高压线损预测[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 122-127, 142.
YANG Jianhua, XIAO Daqiang, ZHANG Wei, et al. Prediction of 1000 kV UHV line loss based on improved RBFNN[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 122-127, 142.
- [3] 梁琛, 王维洲, 马喜平, 等. 基于随机潮流的高比例新能源接入配电网的极限线损分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(12): 34-40, 78.
LIANG Chen, WANG Weizhou, MA Xiping, et al. Analysis on limit line loss in high proportion of renewable energy distribution network based on stochastic power flow[J]. Smart Power, 2022, 50(12): 34-40, 78.
- [4] 金晟, 苏盛, 薛阳, 等. 数据驱动窃电检测方法综述与低误报率研究展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 3-14.
JIN Sheng, SU Sheng, XUE Yang, et al. Review on data-driven based electricity theft detection method and re-research prospect for low false positive rate[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 3-14.
- [5] 余卫国, 熊幼京, 周新风, 等. 电力网技术线损分析及降损对策[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 54-57, 63.
YU Weiguo, XIONG Youjing, ZHOU Xinfeng, et al. Analysis on technical line losses of power grids and countermeasures to reduce line losses[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 54-57, 63.
- [6] 王富, 杨威, 张安安, 等. 油田配电网节能降损投资决策方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 125-133.
WANG Fu, YANG Wei, ZHANG An'an, et al. Investment decision-making method for energy saving and loss reduction in oilfield distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 125-133.
- [7] 张辰琪, 朱成昊, 李洋, 等. 基于随机模糊潮流的三相不平衡配电网节能降损方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 212-218.
ZHANG Chenqi, ZHU Chenghao, LI Yang, et al. Research on energy saving and loss reduction method of three-phase unbalanced power grid based on stochastic fuzzy power flow[J]. Journal of Electric Power Science And Technology, 2022, 37(6): 212-218.
- [8] 刘永光, 谭煌, 李志鹏. 一种基于电能表误差和窃电分析的线损分层定位方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(9):

- 188-194.
- LIU Yongguang, TAN Huang, LI Zhipeng. A hierarchical line loss location method based on the analysis of electricity meter error and electricity stealing[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(9): 188-194.
- [9] 杨正宇, 韩彤, 赵振刚. 基于 ARIMA-GWO-SVR 组合模型的线损率时序预测[J]. *供用电*, 2022, 39(7): 58-63.
- YANG Zhengyu, HAN Tong, ZHAO Zhengang. Time series prediction of line loss rate based on ARIMA-GWO-SVR combined model[J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(7): 58-63.
- [10] 王佳仁, 谢宁, 王承民, 等. 提升现代配电系统效率和效益的研究与实践[J]. *电网技术*, 2018, 42(11): 3543-3549.
- WANG Jiaren, XIE Ning, WANG Chengmin, et al. Research and practice of enhancing efficiency and benefit of modern distribution system[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(11): 3543-3549.
- [11] 国家电网有限公司, 中国电力科学研究院, 等. 电力网电能损耗计算导则: DL/T 686—2018[S]. 北京: 电力标准委员会, 2018.
- [12] 马丽叶, 刘建恒, 卢志刚, 等. 基于深度置信网络的低压台区理论线损计算方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(8): 140-146.
- MA Liye, LIU Jianheng, LU Zhigang, et al. Theoretical line loss calculation method of low voltage transform district based on deep belief network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(8): 140-146.
- [13] 邓鹏, 刘敏. 基于改进聚类和 RBF 神经网络的台区电网线损计算研究[J]. *智慧电力*, 2021, 49(2): 107-113.
- DENG Peng, LIU Min. Power line loss calculation in low voltage region based on improved clustering algorithm and RBF neural network[J]. *Smart Power*, 2021, 49(2): 107-113.
- [14] 李亚, 刘丽平, 李柏青, 等. 基于改进 K-Means 聚类和 BP 神经网络的台区线损率计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4543-4552.
- LI Ya, LIU Liping, LI Baiqing, et al. Calculation of line loss rate in transformer district based on improved K-Means clustering algorithm and BP neural network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4543-4552.
- [15] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(16): 1-13.
- CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 1-13.
- [16] XU B, ZHANG G Y, LI K, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(4): 801-813.
- [17] 伍栋文, 于艾清, 俞林刚, 等. 基于 ICS-K-means 聚类算法和 WNN 的有源低压台区线损估算方法[J]. *智慧电力*, 2022, 50(4): 8-14.
- WU Dongwen, YU Aiqing, YU Lingang, et al. Line loss estimation method based on ICS-K-means clustering algorithm and WNN for transformer district with DGs[J]. *Smart Power*, 2022, 50(4): 8-14.
- [18] 王子晗, 高红均, 高艺文, 等. 基于深度强化学习的城市配电网多级动态重构优化运行方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(24): 60-70.
- WANG Zihan, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. Multi-level dynamic reconfiguration and operation optimization method for an urban distribution network based on deep reinforcement learning[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 60-70.
- [19] 谢荣斌, 杜帆, 程湘, 等. 三相不平衡及谐波对三相四线低压配电网线损的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 22-30.
- XIE Rongbin, DU Fan, CHENG Xiang, et al. Influence of three-phase imbalance and harmonic on line loss of three-phase four-wire low-voltage distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(21): 22-30.
- [20] 林宝德, 杨铮宇. 基于多维特征的电网台区线损数据异常识别研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(9): 172-178.
- LIN Baode, YANG Zhengyu. Anomaly recognition of line loss data in power grid stations based on multi-dimensional features[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(9): 172-178.
- [21] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(3): 503-511.
- PENG Xiaosheng, DENG Diyuan, CHENG Shijie, et al. Key technologies of electric power big data and its application prospects in smart grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(3): 503-511.
- [22] 钱海龙. 一体化电量与线损管理系统的建设与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- QIAN Hailong. The construction and application of integrated power and line loss management system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [23] 樊志华. 国网天府新区供电公司同期线损管理系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- FAN Zhihua. Design and implementation of synchronous line loss management system of state grid Tianfu power supply company[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

- [24] 史雷, 赵滨滨, 徐晓萌, 等. 基于分层节点识别策略的中低压配电网同期线损优化系统的研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 39-45.
SHI Lei, ZHAO Binbin, XU Xiaomeng, et al. Design and implementation of the synchronous line loss optimization system of medium and low voltage distribution network based on hierarchical node identification strategy[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 39-45.
- [25] 范荻, 皇甫成, 王丰, 等. 基于MIT-LXPM改进遗传算法的配电网时间序列三相不平衡优化调控策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 9-16.
FAN Di, HUANGFU Cheng, WANG Feng, et al. Optimal regulation strategy of three-phase imbalance in time series of distribution network based on MIT-LXPM improved genetic algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 9-16.
- [26] 杜振东, 沈春林, 滕晓兵, 等. 计及全时空要素的配电网综合节能评价方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 13-23.
DU Zhendong, SHEN Chunlin, TENG Xiaobing, et al. An evaluation method of integrated energy-saving for distribution network considering total spatial-temporal factors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 13-23.
- [27] 王海云, 卢志刚, 杨莉萍, 等. 基于突变理论的电网线损关键节点辨识[J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 125-129.
WANG Haiyun, LU Zhigang, YANG Liping, et al. Identification of key nodes of power line loss based on catastrophe theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 125-129.
- [28] 洪梦琳. 能源互联网企业数字化人才队伍建设研究[J]. 中国电力教育, 2022(9): 10-11.
HONG Menglin. Research on the construction of digital talent team in energy internet enterprises[J]. China Electric Power Education, 2022(9): 10-11.
- [29] 黄剑湘, 林铮, 刘可真, 等. 考虑换流站海量事件的关联规则挖掘分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 117-125.
HUANG Jianxiang, LIN Zheng, LIU Kezhen, et al. Association rule mining analysis method considering massive events in a converter station[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 117-125.
- [30] 韩平平, 陈思远, 张楠, 等. 考虑分布式光伏的低压台区线损异常辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 140-148.
HAN Pingping, CHEN Siyuan, ZHANG Nan, et al. Line loss anomaly identification method for low-voltage station area considering distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 140-148.
- [31] 杨锡运, 刘玉奇, 李建林. 基于四分位法的含储能光伏电站可靠性置信区间计算方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 136-144.
YANG Xiyun, LIU Yuqi, LI Jianlin. Reliability confidence interval calculation method for photovoltaic power station with energy storage based on quartile method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 136-144.
- [32] 中国电力科学研究院, 湖南省电力公司, 国家电网公司营销部, 等. 电力用户用电信息采集系统通信协议: Q/GDW 1376.1—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [33] 戚远航, 侯鹏, 金荣森. 基于 Q 学习粒子群算法的海上风电场电气系统拓扑优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 66-75.
QI Yuanhang, HOU Peng, JIN Rongsen. Optimization of electrical system topology for offshore wind farm based on Q-learning particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 66-75.
- [34] 高春华, 王洁琼, 杨艳平, 等. 基于后随机非线性动态粒子群算法的地震模拟振动台参数优化设计[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(1): 137-143.
GAO Chunhua, WANG Jieqiong, YANG Yanping, et al. Parameter optimization of shaking table based on later random and nonlinear dynamic particle swarm optimization[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2023, 36(1): 137-143.
- [35] 国家电网报: 高压客户调节功率因数 这款产品能告警提醒[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/2n2v46LWcNp7vAbGiDE5rg>.
- [36] 国家电网报: 高压客户调节功率因数 这款产品能告警提醒高压客户想要节省这笔钱? 这套“神器”帮你做到[EB/OL]. <https://data.cloud.m.sgcc.com/portal/omp/clt/resource/web/H5/dianwangnews/newsDetail.html?contId=1001071643&channelNodeId=368&excludeContId=1001071647>.

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-08-25

作者简介:

张明慧(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量; E-mail: 799484810@qq.com

张逸(1984—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、主动配电网及电力数据分析等; E-mail: zhangyi@fzu.edu.cn

刘必杰(1998—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电能质量。E-mail: fzu-ee-liu@foxmail.com

(编辑 周金梅)