基于消除损耗负面因子的降损方案研究

在电能传输的过程中，造成电能损耗偏高的成因繁多且存在交叉影响的现象，但造成损耗偏高这种负面现象的主要原因有且仅有一个。通过中心差分卡尔曼滤波算法判断损耗偏高的负面因子，对损耗率偏高的环节进行定位；对有可能的“线损负面因子”进行提取、分析和预判断；采取针对性的措施进行技术、管理层面的改进；将改进的结果进行前后比对；通过“负面消除法”逐步消除各类线损负面因子以实现节能降损。

刘晓华/国网新疆电力公司

刘晓华/高级工程师

关键词/Keywords

负面因子·
节能降损·
技术降损·
管理降损·
中心差分卡尔曼滤波算法·

在电能的供给和使用过程中，反映能耗程度的损耗率是衡量电力系统技术运行水平、经济运营程度高低的一项重要指标[1]。电能损耗的成因繁多且相互影响，对于这样一个复杂的大概念问题，从降损方式“正面”来分析问题，往往难以清晰地找到主要成因，而且损耗的治理措施难以准确制定[2-3]；从降损方式的反面或者“负面”思考却容易举例和聚焦，继而增强降损工作的可操作性。当线损问题的“负面因子”消除了一项，“降损”就增加了一项，如此一来“节能”的确切意义自然就会出现。

目前，国内外针对电网节能降损方面的研究主要集中于损耗计算方法、技术降损措施和管理降损措施等单方面的研究[4-6]。损耗计算方法方面，主网的损耗计算方法目前主要采用潮流计算方法，如阻抗法、牛顿－拉夫逊法和$P-Q$分解法等计算方法，随着人工智能理论的发展，遗传算法、人工神经网络和模糊算法也逐渐被用于潮流计算。配电网损耗的计算方法目前主要采用方均根电流法、平均电流法、最大电流法、等效电阻法和电压损失法等。随着计算理论的不断丰富，目前国内外又研究出了改进核心相量机算法、基于动态自适应聚类算法等新方法。在技术降损措施方面，目前国内外主要采用实时无功调节，线路、变压器经济运行，电网无功优化、线路改造、更换节能型变压器和更换节能型电能表等方法[7-9]。管理降损措施方面，国内外目前主要采用加强计量装置和基础档案管理，严格抄表制度，杜绝“跑、冒、滴、漏”等措施。上述方法虽然可以判定损耗程度，但无法准确地找到造成具体损耗的关键因素。

本文通过中心差分卡尔曼滤波（Central Difference Kalman Filter，CDKF）算法[1]对有可能造成线损率升高的“线损负面因子”进行提取、分析和预判断；从理论计算以及实测统计所反映出在数据指标层面上线损率偏高的环节进行定位；逐步采取针对性的措施进行技术、管理层面的改进；将改进的效果反馈回理论计算系统以及实测统计系统进行数据指标的前后比对；通过“负面消除法”逐步消除各类线损负面因子以实现节能降损的目的。

损耗负面因子的特征分析

全方位开展降损工作的前提必须是准确地找到损耗成因，损耗成因的判定依赖于损耗综合数据的真实性和有效性。损耗综合数据包括损耗历史数据、实测数据以及预测数据的标准化整合，为损耗各种成因的分析提供依据。

中国知网 https://www.cnki.net

1. 基于标准化的损耗大数据中心建立

通过历史记录数据、实时测量数据以及未来预测数据的数据表结构和数据格式综合标准化，进行节能降损大数据中心的建设，具体结构如图1所示。

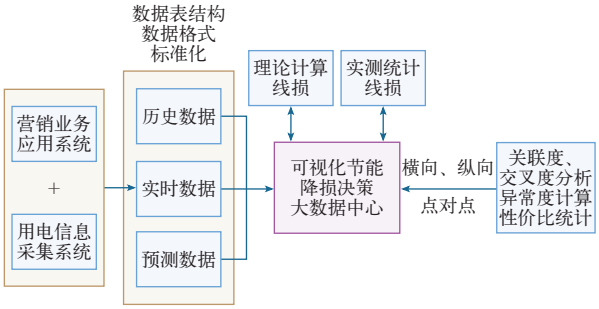

图1 节能降损大数据中心建设结构图

考虑不同损耗指标之间内在联系的疏密程度，通过横向、纵向和点对点的拓扑分析，在数据表结构和数据结构双层面下，将所含节能降损相关信息的具体数据标准化后与计算模块对接，实时传输理论损耗计算和实测统计数据结果，并联立数据存储部分，数据中心所对多数据进行关联度、交叉度的分析，实现电网资源信息的完整性、准确性和唯一性，为后续理论计算和统计计算提供基础。

2. 损耗成因的特征分析

由于电网结构的复杂性，负荷功率性质的多样性，负荷功率实时变化性，外部环境条件不确定性，要完全准确计算出配电网理论线损实际是不可能的，无论采用哪种计算方法和计算模型，只能是尽力做到理论运行状态尽可能接近实际运行状态，使计算结果尽可能准确，近似于实际值。

电能的损耗与时间有必然的联系，可以假设电能的损耗量A为时间的函数，如式（1）所示

$$A=\sum A_i(t)\quad i=1,2,3,\cdots \tag{1}$$

式中，$A_i(t)$为各种形式的损耗表现。常见的诸如电压偏低、三相不平衡和无功传输量偏多等所造成的电能损耗。根据以往降损经验的分析结果可知，造成损耗偏高的最主要因素往往取决于在单位时间内，这种形式电能损耗变化程度的快慢，对式（1）进行求导，得

$$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}=\sum\frac{\mathrm{d}A_i(t)}{\mathrm{d}t}\quad i=1,2,3,\cdots \tag{2}$$

假设

$$A_i(t)=K_{i0}+K_{i1}t+K_{i2}t^2+\cdots+K_{in}t^n \tag{3}$$

将式（3）代入式（2），得

$$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}=\sum\frac{\mathrm{d}A_i(t)}{\mathrm{d}t}=\sum\frac{\mathrm{d}K_{in}t^n}{\mathrm{d}t}=\sum K_{i1}+\sum K_{in}t^{n-1}\quad i=1,2,3,\cdots \tag{4}$$

由于计算中的实际取样时间（毫秒级）相对于损耗的累计时间（秒级）很短，所以式（4）中关于时间t^{n-1}的项实际数值很小，可以忽略不计，则损耗变化快慢可表示为

$$\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}t}=\sum K_{in}\quad i=1,2,3,\cdots \tag{5}$$

则实际中表现最大的K_{in}即为前述损耗的“负面因子”表现程度项。

基于CDKF的损耗负面因子提取

如何准确地对负面因子进行定位，是实现高效降损的关键所在。前文中所提及的负面因子特征是损耗变化特性的具体表现，在实际工程中，利用大数据中心内部的信息对负面因子进行数据挖掘是一种有效的技术手段。

负面因子的具体特点为所涵盖下的数据变化程度很大，在实际当中，其他损耗因子的变化程度远远小于负面因子，从数据处理的角度来讲，如何在数据丛中抽取这类具有“变化程度很快”特点的数据是准确定位损耗负面因子的关键。

这种数据挖掘并提取特征的过程在应用数学中属于数据滤波的范畴。数学滤波算法有很多，现阶段所提的一种CDKF算法，其核心思想是采用中心差分变换对非线性状态的后验分布（均值和协方差）进行近似。与扩展卡尔曼滤波（Extended Kalman Filter，EKF）算法相比，CDKF算法在滤波过程中无须计算非线性状态函数和量测函数的雅可比矩阵。而且比无损卡尔曼滤波（Unscented Kalman Filter，UKF）算法的实现更加简单。对于

中国知网 https://www.cnki.net

系统模型非线性程度如何，中心差分变换理论上至少能以二阶泰勒准确度逼近任何非线性状态的后验均值和协方差。鉴于上述优点和适用性，本文将采用CDKF算法对电网损耗特征进行数据特征的提取。

CDKF算法是近几年出现的一种全新的非线性滤波方法，利用CDKF算法可以估计经任意非线性变换后的均值与协方差。借助Sterling 插值公式将非线性模型按中心差分形式展开，不需要计算函数的偏导数，而且状态估计结果不受非线性函数不连续且存在奇异点的影响。

在实际的损耗计算过程中，可以将损耗的负面因子看作是正常损耗水平范畴外的各种“扰动干扰”，本文之所以采用CDKF算法的出发点是这种算法可以根据大数据中心上一时刻的损耗数据状态量，在各种扰动的干扰下可以较为准确地预测本时刻的状态量，而且在实际电网中，损耗负面因子的出现基本上服从高斯分布，而且负面因子的波动所造成的损耗变化以突变的形式居多，符合CDKF算法的应用条件。

假设非线性系统为

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= f(x_n, v_n) \\ y_n &= h(x_n, w_n) \end{aligned} \tag{6}$$

式中，f、h分别为损耗的计算方程和特征提取方程；x和y分别为系统在某一时刻的损耗值和损耗特征值；v和w分别为某时刻的负面因子。

对于非线性模型中的L维状态相量，CDKF算法的Sigma点的个数为$2L+1$。为了使Sigma点具有与真实状态分布相同的均值、方差以及高阶中心矩，Sigma点和权值按照以下各式构造

$$x_0 = \bar{x} \tag{7}$$

$$x_i = \bar{x} + h\sqrt{P_{x,i}} \quad i = 1, 2, \cdots, L \tag{8}$$

$$W_0 = \frac{(h^2 - L)}{h^2} \tag{9}$$

$$W_i = \frac{1}{2h^2} \quad i = 1, 2, \cdots, 2L \tag{10}$$

CDKF的具体算法分为以下四个步骤。

1）生成初始值，即

$$\tilde{x}_0 = E(x_0) \tag{11}$$

$$P_0 = E[(x_0 - \tilde{x}_0)(x_0 - \tilde{x}_0)^{\mathrm{T}}] \tag{12}$$

2）构造Sigma点，即

$$x_{n-1} = (\tilde{x}_{n-1}\tilde{x}_{n-1} + h\sqrt{P_{n-1}}\tilde{x}_{n-1} - h\sqrt{P_{n-1}}) \tag{13}$$

3）时间更新，即

$$x_{n|n-1} = f(x_{n-1}) \tag{14}$$

$$\tilde{x}_{\bar{n}} = \sum W_i x_{i,n|n-1} \tag{15}$$

$$P_{\bar{n}} = \sum W_i (x_{i,n|n-1} - \tilde{x}_{\bar{n}})(x_{i,n|n-1} - \tilde{x}_{\bar{n}})^{\mathrm{T}} + P_w \tag{16}$$

$$y_{n|n-1} = h(x_{n|n-1}) \tag{17}$$

$$\tilde{y}_n = \sum W_i y_{i,n|n-1} \tag{18}$$

4）测量更新，即

$$P_{xnyn} = \sum W_i (x_{i,n|n-1} - \tilde{x}_{\bar{n}})(y_{i,n|n-1} - \tilde{y}_{\bar{n}})^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

$$P_{ynyn} = \sum W_i (x_{i,n|n-1} - \tilde{x}_{\bar{n}})(y_{i,n|n-1} - \tilde{y}_{\bar{n}})^{\mathrm{T}} + P_v \tag{20}$$

$$K_k = P_{xnyn} P_{ynyn}^{-1} \tag{21}$$

$$\tilde{x}_n = \tilde{x}_{\bar{n}} + K_n(y_n - \tilde{y}_{\bar{n}}) \tag{22}$$

$$P_n = P_{\bar{n}} - K_n P_{ynyn} K_n^{\mathrm{T}} \tag{23}$$

式中，P_w，P_v分别为表征负面因子存在与否的特征度。根据以上四步、每次计算完成后只需储存本次计算结果值以备下次计算使用，数据存储量小。

案例分析

本文所研究的消除负面因子降损方案在某地区实施过程中，对损耗原因的定位准确度高，而且速度快，以下就具体案例进行分析。

1. 降损案例1

某日，计算系统显示某线路损耗率在t_0时刻突增，一度高达3.86%，本线路理论损耗合理阈值为1.69%，统计损耗率明显偏高。具体损耗波形如图2所示。

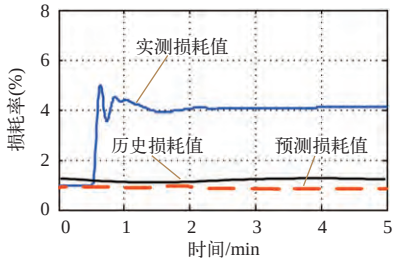

图2 案例1损耗波形图

中国知网 https://www.cnki.net

通过负面因子法进行损耗成因定位，具体负面因子变化如图3所示。

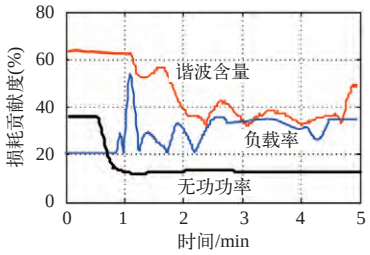

图3　案例1负面因子变化波形图

通过以前历史数据以及降损成因的分析，发现造成损耗率高的原因主要有三点，分别是谐波含量、负载率以及无功功率的传输。

通过负面因子法的分析，可以看出图2中负载率在t_0时刻的突增程度是最明显的，所以主要的负面因子是线路负载率过高。经自动分析，该线路负载率前1个月保持在98%以上，负荷高峰期甚至可达109%。

根据具体原因，供电公司新建了一条LGJ－185线路，将原来的单回线改为双回线运行。根据后半年的运行数据统计计算线路损耗率，发现线路损耗率降为1.73%，损耗率降低了2.13%，月均节约电量48.76万kW·h。

2. 降损案例2

某日，计算系统显示某线路损耗率在t_0时刻突增，损耗率较以往明显异常，一度高达到18%，以往损耗率未超过0.9%。本线路理论损耗合理阈值为1.69%，统计损耗率明显偏高。具体损耗波形如图4所示。

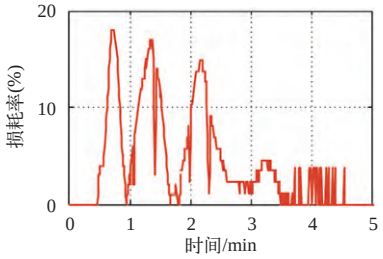

图4　案例2损耗波形图

本线路是辖区内某公司的专线，日均用电量20.5万kW·h，采用高供低计的计量方式，通过以往的历史数据以及成因分析，发现造成损耗异常的主要原因可能有两个，即计量设备故障或窃电行为的出现。通过负面因子法进行损耗成因定位，具体负面因子变化如图5所示。

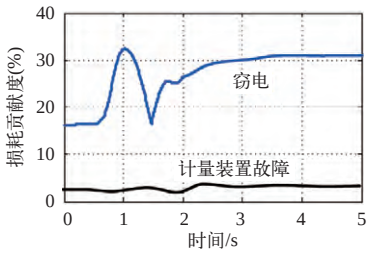

图5　案例2负面因子变化波形图

通过负面因子法的分析，可以看出图5中窃电现象在t_0时刻的突增程度最明显，所以主要的负面因子是出现了窃电现象。排除其他造成实际损耗偏高的技术以及管理因素，怀疑该公司有窃电嫌疑。供电公司立即派出用电检查人员进行现场确认，发现该公司采用高科技手段使电能表走码阶段性地变慢，从而窃电。最终共追回损失电量2.89万kW·h。

3. 降损案例3

某日，计算系统显示某线路损耗率在t_0时刻突增，损耗率较以往明显异常，损耗率提升程度达20%，以往损耗率的波动程度未超过5%。本线路理论损耗合理阈值为15%，统计损耗率明显偏高。具体损耗波形如图6所示。

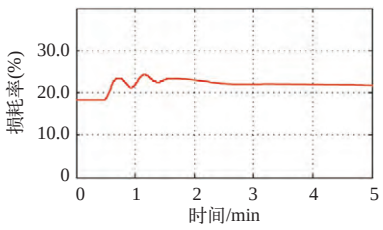

图6　案例3损耗波形图

通过以往的历史数据以及成因分析，发现造成损耗异常的主要原因可能有三个，三相不平衡、电压偏低以及谐波的出现。通过负面因子法进行损耗成因定位，具体负面因子变化如图7所示。

通过以前历史数据以及降损成因的分析，发

中国知网 https://www.cnki.net

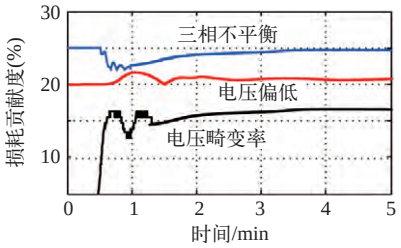

图7　案例3负面因子变化波形图

现造成损耗率高的原因主要有三点，分别是谐波含量、电压偏低以及电压畸变率增高。

通过负面因子法的分析，可以看出图7中电压畸变率在t_0时刻的突增程度是最明显的，所以主要的负面因子是线路非线性负载过多。经自动分析，该线路负载于前1个月增加了4 MW的变频装置。

根据具体原因，供电公司与用户协商，投运了一套滤波器。根据后半年的运行数据统计计算线路损耗率，发现线路损耗率降为16.2%，月均节约电量14.86万kW·h。

结束语

本文所研究的负面因子消除降损法在某地区电网推广应用，目前覆盖了多个电压等级电网。通过该方法的推广应用，可以更快速地实现电网损耗的“四分”（分区、分压、分线、分台区）统计能力，具体结论如下。

1）实现了损耗计算从人工离线计算、统计到系统自动计算、统计的跨域式发展，大大提高了工作效率。

2）能在更短的时间内准确定位管理和技术降损方面存在的问题，并提出经济最优的降损措施，从而达到了经济、科学降损的目的，降损效果显著。

参考文献

[1] 鄢长春，张焰，陈章潮，等．配电网网损计算新方法的研究 [J]．电工电能新技术，1999 (4)．

[2] 孙寄生．基于地理信息系统配电网理论线损在线计算 [J]．供用电，2006，23 (6)．

[3] 周士跃，陈军，刘海燕．电力网电能损耗在线计算与分析系统 [J]．电网技术，2007，31 (9)．

[4] 丁晓群，刘小波，周志辉．基于实时系统数据的电网综合线损分析方法及其应用 [J]．电力自动化设备，2005，3 (3)．

[5] Goswami S K，Basu S K．A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1992，7 (3)：1484-1491．

[6] Zhang Fang，Cheng Carol S．A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1997，12 (1)：389-397．

[7] 王长胜．浅谈合理安排电网调度降损节能 [J]．科技创新与应用，2013，28 (15)：161．

[8] 程秀娟，周步祥，廖烽然．电网规划中的网络损耗评估算法研究与应用 [J]．四川电力技术，2011，34 (3)：14-18．

[9] 崔迎军．配电网线损在线计算分析与实践 [D]．北京：华北电力大学，2008．

[10] Karim Salahshoor，Mohsen Mosallaei，Mohammadreza Bayat．Centralized and decentralized process and sensor fault monitoring using data fusion based on adaptive extended Kalman filter algorithm [J]．Measurement，2008 (10)：14-18．

（收稿日期：2015－02－10）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

中国知网　https://www.cnki.net