

变电站能效评估指标体系及建模方法

罗志坤¹,刘潇潇¹,陈星莺²,丁孝华²,余 昆²,万 全³,何军民³,李 光³

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院,湖南 长沙 410000;2. 河海大学 江苏省配用电与能效工程技术研究中心,江苏 南京 211100;3. 国网湖南节能服务有限公司,湖南 长沙 410000)

摘要: 变电站在输送电能的过程中会产生大量能耗,变电站能效评估是进行电力系统能效提升的基础。首先,分析了变电站的能效及其影响因素;然后,从电气设备性能、系统运行状态、建筑结构性能和运行环境因素 4 个角度构建变电站能效评估指标体系,并给出指标计算模型;采用层次分析法(AHP)求取各能效指标权重,并利用灰色关联分析法对变电站进行能效综合评估;对实际变电站数据进行仿真分析,结果表明基于灰色 AHP 的变电站能效评估指标及模型能够有效反映变电站的能效水平。

关键词: 变电站; 能效评估; 指标体系; 计算模型; 综合评估; 影响因素; 灰色关联分析; 层次分析法

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.022

0 引言

变电站作为电能转换与输送过程中的枢纽环节与重要节点^[1-2],数量众多,耗电量大,所以提升变电站的能效对建设绿色低碳电网意义重大。实际运行中,往往由于设施老旧、运行不合理等原因导致变电站电能浪费和能效不高,在变电站的规划建设阶段进行节能设计是一项必须考虑的内容^[3],在运行过程中通常会实施变压器经济运行^[4]、无功优化控制^[5-6]等措施降低主变损耗,对能效低的变电站还要求进行节能改造^[7-8]。当前开展的智能变电站建设是一个热门话题,在对变电站进行智能化改造过程中,需兼顾变电站的节能降耗目标,对改造前后的变电站能效进行评估。因此,建立能全面反映变电站能耗大小及能效水平的指标和评估方法是亟待解决的问题。

电力系统各个电压等级的变电站分布在高温、严寒等不同环境中,能耗及能效的影响因素具有差异,目前直接针对变电站的主要能耗分析及能效评估的研究很少^[9-10]。文献^[3]从节能设计角度构建了变电站节能评价指标体系,将变电站设备能效评估指标分为土建、水暖等配套设施能效,变压器、导体、照明等通用设施能效,以及空调系统、直流系统等自动化控制系统能效 3 个方面。文献^[11-12]针对轨道交

通系统供电的变电站进行能效分析,分别论述了通过整流器和储能来提高能效。

本文针对目前缺乏变电站整体能效水平的评估现状,对我国南北方不同地区的变电站进行实地调研分析,以此为基础对变电站能效关键影响因素进行筛选,建立变电站能效综合评估指标体系,将灰色关联分析法与层次分析法(AHP)^[13-15]相结合,用 AHP 满足评估体系的多层次要求,并利用权重计算结果对灰色关联分析法进行修正,构建变电站能效综合评估模型,用于对变电站能效进行整体评估。

1 变电站能效及其评估指标体系

1.1 变电站能效及其影响因素分析

从物理学角度来看,能效是指在能源利用或变换过程中,发挥作用的能源量与实际消耗的能源量之比^[16];提高能效是指在发挥同样作用的情况下消耗更少的能源,故降低能耗是提高能效的关键。变电站的作用是实现电能的传输和转换,在此过程中需要消耗电能以保证各种设备的正常工作,因此,本文采用流出变电站的电能与流入变电站的电能之比来衡量变电站能效,即变电站的能效水平取决于变电站内的主要电能消耗及其影响因素。

根据变电站的用能特点,可以将变电站能耗分为一次设备能耗、二次设备能耗和辅助设备能耗三大类,变电站能耗分类及构成如图 1 所示。一次设备的能耗一方面可由其性能参数直接反映,如变压器空载损耗和短路损耗、电容器介质损耗角的正切值等,另一方面还受到通过设备的电流、功率等运行因素的影响。由于二次设备数量众多、单个设备能耗小,因此考虑变电站二次设备能耗影响因素时,应着眼于总体情况,主要考察设备数量、设备工况与工作

收稿日期:2016-02-18;修回日期:2017-01-06

基金项目:国家电网公司科技项目(智能变电站能效评测与能效提升关键技术研究及试点工程建设);国家发改委物联网专项基金资助项目(基于物联网的智能用电综合管理与能效提升技术研发及产业化)

Project supported by the Science and Technology Research Program of State Grid Corporation of China(the Research and Development for Self-healing Control Technology in Smart Distribution Grid) and the National Development and Reform Commission(the Research,Development and Industrialization for Integrated Management of Smart Distribution Grid & Utilization and Enhancing Energy Efficiency Technology Based on Internet of Things)

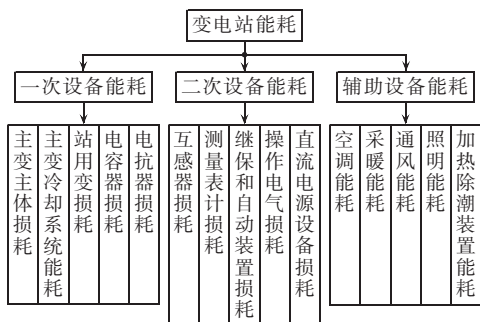


图 1 变电站能耗分类

Fig.1 Classification of energy consumption for substation

是维持变电站正常的运行环境,其能耗受变电站建筑和外界环境影响较大,因此除了考虑辅助设备本身的节能性能外,还需考虑建筑的通风、保温和隔热等性能,及外界温度、湿度等气象因素。因此,本文认为可将影响变电站能效及能耗的因素分为设备因素、运行因素、建筑因素和环境因素 4 个方面进行分析。

1.2 变电站能效评估指标体系

变电站能效评估的关键在于建立的指标能否全面涵盖变电站的能源利用情况,并且能够通过可获取的基础数据进行评估。通过对变电站能耗测量和上述变电站能效及其影响因素的分析,本文提出从电气设备性能、系统运行状态、建筑结构性能和运行环境因素 4 个方面建立变电站能效评估指标体系,如图 2 所示。所选取的指标既要全面反映变电站的能效及

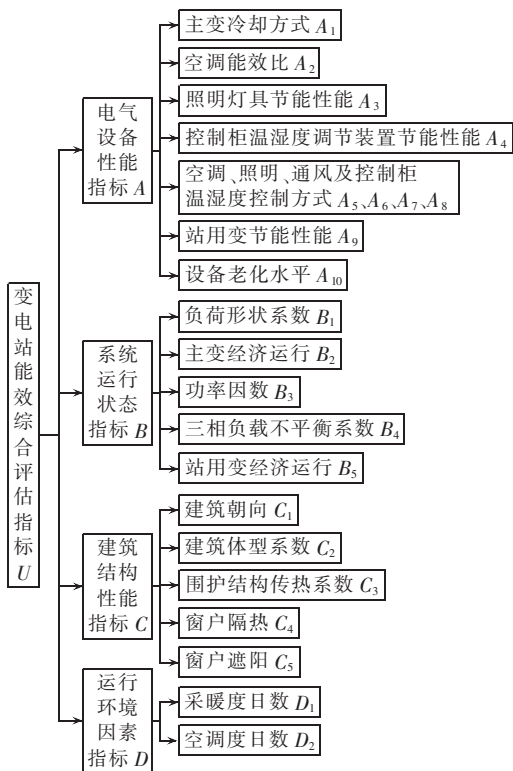


图 2 变电站能效评估指标体系

Fig.2 Energy efficiency evaluation index system of substation

其影响因素,同时还要兼顾指标体系的易用性和数据的可获取性。

指标体系的最上层为目标层:变电站能效综合评估指标 U ,用于反映变电站能效的总体水平。中间层为原则层,包括电气设备性能指标 A 、系统运行状态指标 B 、建筑结构性能指标 C 和运行环境因素指标 D ,该层指标体现了变电站能效的主要影响因素。最底层为指标层,电气设备性能指标主要考虑主变冷却装置、空调、照明、通风、控制柜加热除湿、站用变等设备状态及其控制方式;系统运行状态指标反映变电站运行状态相关的因素对能耗及能效的影响,包括负荷曲线、功率因数以及变压器经济运行等因素;建筑结构性能指标包含了变电站建筑的基本能效信息;运行环境因素指标主要考虑温度对变电站空调和供暖系统能效的影响。

2 变电站能效评估指标计算模型

2.1 电气设备性能指标

(1)主变冷却方式 A_1 。

老式变压器大多采用强迫油循环风冷却系统,一般有 2 组冷却装置同时运行,每组冷却装置备有 2 台风扇和 1 台油泵机,损耗电量较大。相对而言,采用自然冷却方式的主变能耗小,因此采用变电站内自然冷却主变占比来衡量冷却方式对能效的影响,计算公式如式(1)所示。

$$A_1 = \frac{N_{NCT}}{N_T} \tag{1}$$

其中, N_T 为主变总台数; N_{NCT} 为自然冷却主变台数。

(2)空调能效比 A_2 。

每个变电站都配有多台空调设备,空调是变电站内能耗较大的设备之一。单台空调具有标准的能效比计算公式,如式(2)所示。

$$E_{ER} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{2}$$

其中, P_{out} 为空调在额定输入功率下的制冷量; P_{in} 为空调额定输入功率。

本文以空调的能效比参数为基础,采用加权平均法计算整个变电站的空调能效比,如式(3)所示。

$$A_2 = \sum_{i=1}^{N_A} E_{ERi} \frac{P_{out,i}}{P_{out,total}} \tag{3}$$

其中, N_A 为变电站中空调总台数; E_{ERi} 为第 i 台空调的能效比; $P_{out,total}$ 为所有空调总额定制冷量; $P_{out,i}$ 为第 i 台空调的额定制冷量; $P_{out,i}/P_{out,total}$ 为加权系数。

(3)照明灯具节能性能 A_3 。

照明系统也是变电站的主要能耗设备之一,照明能耗与灯具的功率和照明时间相关,变电站内不同场所、不同用途的照明灯具的功率和照明时间差异较大。但是,对于同一照明灯具而言,其节能性能

取决于灯具的性质,因此采用变电站内节能型灯具总功率与灯具总功率的比值来计算照明灯具的节能性能指标,如式(4)所示。

$$A_3 = \frac{\sum_{i=1}^M P_{es,i}}{\sum_{j=1}^{N_L} P_j} \quad M \leq N_L \quad (4)$$

其中, N_L 为变电站中灯具的总数; M 为变电站中节能型灯具的总数; P_j 为变电站中第 j 个灯具的功率; $P_{es,i}$ 为变电站中第 i 个节能型灯具的功率。

(4)控制柜温湿度调节装置节能性能 A_4 。

变电站的端子箱、智能控制柜、高压断路器控制柜、低压开关柜等柜体内一般都装有加热去潮装置,包括加热片、带风扇加热片、热交换器3类。加热片的能效最低,热交换器能效最高,因此从节能角度出发,加热片赋值0分,带风扇加热片赋值0.5分,热交换器赋值1分,然后对变电站内所有控制柜温湿度调节装置取平均分建立控制柜温湿度调节装置节能性能指标计算公式,如式(5)所示。

$$A_4 = \frac{0.5N_2 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3} \quad (5)$$

其中, N_1 、 N_2 、 N_3 分别为变电站内加热片、带风扇加热片、热交换器的个数。

(5)空调、照明、通风及控制柜温湿度控制方式 A_5 — A_8 。

变电站内空调、照明、通风及控制柜温湿度控制方式对变电站能效影响较大,手动控制能效低,自动控制能效高。变电站的实际情况是部分设备手动控制、部分设备自动控制,如室外照明采用光控自动控制,室内照明采用手动控制;一些控制柜通过手动方式来控制温湿度调节装置,另一些控制柜则采用自动控制方式进行调节。因此,针对这类指标采用自动控制设备的功率占比来进行计算,如式(6)所示。

$$A_i = \frac{P_{\text{auto}}}{P} \quad i=5,6,7,8 \quad (6)$$

其中, A_5 — A_8 分别为空调、照明、通风及控制柜温湿度控制方式指标; P_{auto} 为自动控制方式下的设备总功率; P 为设备总功率。

(6)站用变节能性能 A_9 。

站用变的型号种类多种多样,每一种型号站用变的空载损耗和短路损耗都不相同,其节能性能的差异主要取决于站用变的型号系列。本文以当前能效最高的型号系列为基准,对主要站用变型号系列的节能性能进行分级赋值,其值为0~1之间的数。则站用变节能性能指标可用式(7)进行计算。

$$A_9 = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{DT}}} S_i}{N_{\text{DT}}} \quad (7)$$

其中, N_{DT} 为变电站中站用变台数; S_i 为站用变的节能性能得分。

(7)设备老化水平 A_{10} 。

设备老化会引起设备电阻及表面绝缘介质的变化,导致同样的工作条件下设备能耗的增加,本文采用变电站主要电力设备老化损失因数的平均值作为设备老化水平指标计算值,计算公式如式(8)所示。

$$A_{10} = \frac{\sum_{i=1}^{N_E} (1 + Y_i / 80)}{N_E} \quad (8)$$

其中, N_E 为变电站内主要设备数量,变电站的主要设备包括主变、站用变、并联电容器、断路器以及刀闸等; Y_i 为第 i 个设备的运行年数,设备的运行年限取20a,当设备运行年数超过20a时, Y_i 统一赋值为32a。

2.2 系统运行状态指标

(1)负荷形状系数 B_1 。

负荷形状系数 K 是一段时间内均方根电流 I_{eff} 与平均电流 I_{ar} 之比,如式(9)所示,其值的大小反映了负荷曲线的变化对电力设备损耗的影响,形状系数越大,设备能耗越大,如果负荷曲线变化平缓,则形状系数趋近于1,设备的能耗较小。

$$B_1 = K = \frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{ar}}} \quad (9)$$

(2)主变经济运行 B_2 。

变压器运行时产生的有功功率损耗率与变压器负载率呈非线性变化关系,随着负载率的增大,损耗率先减小后增大,通过合理选择主变运行方式可减少能耗、提高能效。本文以双绕组变压器为例,取最佳经济运行区上限为负载率的75%,则主变经济运行指标的计算式如式(10)所示。

$$B_2 = \begin{cases} \beta & \beta < \beta_j \\ 1.33\beta_j^2 + \frac{0.75-\beta}{0.75-\beta_j}(\beta_j - 1.33\beta_j^2) & \beta_j \leq \beta < 0.75 \\ 2.33\beta_j^2 - 1.33\beta\beta_j^2 & 0.75 \leq \beta < 1 \end{cases} \quad (10)$$

其中, β 为变压器的平均负载率; β_j 为变压器经济运行点的负载率。

(3)功率因数 B_3 。

无功功率在电阻中流过时会引起额外的能量损失,当有功功率一定时,功率因数越低,损耗率越大,提高功率因数对能耗改变量的影响也越大。本文提出采用主变各侧功率因数进行加权平均来反映整个变电站的功率因数对其能效的影响,如式(11)所示。

$$B_3 = \sum_{i=1}^{N_w} \frac{P_{Li}}{P_{\text{total}}} \cos \varphi_i \quad (11)$$

其中, N_w 为变电站内所有主变的绕组数之和; $\cos \varphi_i$ 为主变 i 侧的功率因数; P_{Li} 为主变 i 侧的有功负荷; P_{total} 为变电站内所有主变各侧有功负荷的总和。

(4)三相负载不平衡系数 B_4 。

变压器三相负载不平衡将引起变压器A、B、C

三相绕组中的损耗发生变化,在总负荷一定的情况下,三相负载越不平衡,主变的能耗越大、能效越低。本文将三相负载不平衡系数作为反映能效水平的指标,计算公式如式(12)所示。

$$B_4=F_{\varphi}=\frac{S_{\max}-S_{\min}}{S_{av}} \tag{12}$$

其中, F_{φ} 为三相负载不平衡系数; $S_{\max}$ 为三相中的最大负载; $S_{\min}$ 为三相中的最小负载; S_{av} 为三相平均负载。

(5)站用变经济运行 B_5 。

站用变为变电站内的生产生活用电提供保障,其容量较小,且长时间处于轻载运行和热备用状态,一般而言能效较低。本文将站用变的经济运行情况也作为能效的一个评价指标,其计算公式与主变相同,不再赘述。

2.3 建筑结构性能指标

(1)建筑朝向 C_1 。

建筑物内部冷热负荷的大小与建筑的朝向密切相关,合理的建筑朝向有利于空调和供暖系统节能。当建筑物的平面形状相同时,南北朝向建筑物内部的冷热负荷比东西朝向建筑物少^[17],文献[18]明确指出我国建筑朝向应采用南北朝向或接近南北朝向。因此,变电站建筑为南北朝向时 C_1 设为 1,东西朝向时 C_1 为 0,其他情况设为 0 和 1 之间的数。

(2)建筑体型系数 C_2 。

建筑体型系数为建筑的外表面积与其体积的比值,该指标反映了建筑物单位空间的散热能力,当建筑围护结构传热系数相等时,体型系数越大的建筑,保温隔热性能越差,其能耗也越高,模拟实验表明若体型系数增加 0.1 个单位,相应建筑的能耗增加约 25%^[19]。建筑体型系数的计算公式如式(13)所示。

$$C_2=S=\frac{F_0}{V_0} \tag{13}$$

其中, S 为建筑体型系数; F_0 为建筑的外表面积; V_0 为建筑体积。

(3)围护结构传热系数 C_3 。

建筑围护结构的导热性能主要影响采暖与空调的冷热负荷,当建筑围护结构的保温隔热效果较差时,夏季室外的热量易传入室内,冬季室内的热量也易透过围护结构散发到室外,导致采暖与空调的冷热负荷增加。因此,提高变电站的建筑围护结构保温性能对降低能耗、减少变电站空调设备的容量有重要作用。热量从围护结构一侧传递到另一侧所受阻力称为围护结构传热阻,单一材料围护结构传热阻与材料层的厚度成正比,与材料的导热系数成反比,当围护结构的材料有多层时,其传热阻为各层传热阻的总和。围护结构传热系数取为传热阻的倒数,即:

$$C_3=K_H=\frac{1}{R_0} \tag{14}$$

其中, R_0 为总传热阻; K_H 为围护结构的传热系数。

(4)窗户隔热 C_4 。

窗户的传热系数远高于外墙,其传热量一般为墙体的 5~20 倍^[20],隔热能力差,统计数据表明,夏季由窗户进入室内的热量占空调冷负荷的 25% 左右,冬季从窗户玻璃损失掉的热量约占供暖总负荷的 15%^[21]。本文根据目前主要类型的窗户玻璃节能性能进行能效评分,分值越高表示窗户隔热性能越好,比如普通玻璃的隔热性能最差,其值为 1 分,其他类型的评分情况如表 1 所示。

表 1 窗户隔热指标评分
Table 1 Scores of window thermal insulation index

玻璃类型	得分	玻璃类型	得分
Low-e	5	中空	2
镀膜	4	普通	1
吸热	3		

(5)窗户遮阳 C_5 。

由上述分析可知,阳光透过窗户对变电站建筑内的冷热负荷影响较大,窗户遮阳则是提高能效的重要措施。窗户遮阳包括窗帘、百叶帘等室内遮阳方式和遮阳棚等室外遮阳方式,对防止变电站夏季室内气温上升作用明显,同时,室内遮阳方式还可通过灵活设置遮阳状态方便冬季阳光照射入室内以提高能效。因此,综合考虑,当变电站建筑物窗户无遮阳措施时该指标取 0,有遮阳措施时取 1。

2.4 运行环境因素指标

变电站分布广,其运行环境复杂,站内的一、二次电气设备都要求工作在特定的温湿度环境下,空调设备、控制柜温湿度调节装置等的工作状态与温度、湿度密切相关,为了分析气候温度等运行环境对变电站能效的影响,本文考虑计算采暖度日数 HDD(Heating Degree Day)和空调度日数 CDD(Cooling Degree Day) 2 个指标来衡量。

(1)采暖度日数 D_1 。

在采暖期内,室内基准温度减去室外日平均温度,并逐日累加求和得到采暖度日数,如式(15)所示,该指标用于反映冬季等低温情况下环境对变电站能耗量及能效的影响。

$$D_1=\sum_{i=1}^T(t_R-t_{m,i}) \tag{15}$$

其中, D_1 为采暖度日数; T 为采暖期天数或计算天数; t_R 为室内基准温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$,我国大部分地区取 19°C ; $t_{m,i}$ 为采暖期室外第 i 天的日平均温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

(2)空调度日数 D_2 。

在供冷期内,室外日平均温度减去室内基准温度,并逐日累加求和得到空调度日数,如式(16)所示,该指标用于反映夏季等高温情况下环境对变电

站能耗量及能效的影响,此时 t_R 一般取 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

$$D_2=\sum_{i=1}^T(t_{m,i}-t_R) \quad (16)$$

3 基于灰色 AHP 的变电站能效综合评估

3.1 评估指标的标准化处理

如上所述,本文建立了反映变电站能效水平的评估指标及其计算模型,由于各指标的量纲和指标取值的变化区间差异较大,为保证评估结果的客观性与合理性,首先需要对评估指标进行标准化处理。所建立的指标可以分为极大型、极小型和区间型 3 种类型,如空调能效比属于极大型指标,主变冷却方式属于极小型指标,主变经济运行属于区间型指标,本文首先将其统一化为极大型指标,且标准化为 $[0,1]$ 之间的无量纲值^[14]。变电站能效综合评估具有 3 层指标,需要逐级向上综合才能获得变电站的整体能效水平,各指标针对其上层指标的重要性具有差异,通过赋予不同的权重来体现,本文采用基于 9 级标度的 AHP 确定各评估指标的权重^[22]。

3.2 灰色关联度的计算

灰色关联分析法的主要思想是将信息不完全系统的内部因子序列化,并定量表示各因子间发展趋势的异同程度,以此来衡量相互间的关联程度。本文采用灰色 AHP 进行变电站能效评估的关键是计算指标的灰色关联度。

假设变电站能效评估指标个数为 n ,待评估变电站个数为 m ,用初始指标矩阵 R 表示参与评估的变电站及其指标的值,如下所示:

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

则求取各变电站灰色关联度的过程如下。

a. 确定理想变电站 R_0 为参考列,记为 $R_0=[r_{01}, r_{02}, \cdots, r_{0n}]$,这里取各个指标的最优值作为 $r_{0j}(j=1,2, \cdots, n)$ 的值。

b. 无量纲化处理 R_0 与各评估指标,由于 R_0 为各指标的最优值,因此标准化后为 1,将处理后的无量纲数据进行组合得到新的待评估对象指标矩阵 S :

$$S=\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix}$$

c. 令 $S_i=(s_{i1}, s_{i2}, \cdots, s_{in})$,其中 $i=0,1, \cdots, m$,则以 S_0 作为参考,依次计算 S_i 与 S_0 相应指标的关联系数 $\beta_i(j)$:

$$\beta_i(j)=\frac{\min_i \min_j |s_{0j}-s_{ij}|+\rho \max_i \max_j |s_{0j}-s_{ij}|}{\max_i \min_j |s_{0j}-s_{ij}|+\rho \max_i \max_j |s_{0j}-s_{ij}|} \quad (17)$$

其中, $i=1,2, \cdots, m; j=1,2, \cdots, n; \rho$ 为各指标的分辨系数,根据 AHP 的计算结果,取 $\rho=\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \omega_j U_{ij}, U_{ij}$ 为第 i 个变电站第 j 个指标的标准化值; ω_j 为第 j 个指标的权重。

d. 针对各被评估对象,计算各指标关联度的加权平均值,即可得到各被评估对象与理想对象之间的灰色关联度,如式(18)所示。

$$x_i=\sum_{j=1}^n \beta_i(j) \omega_j \quad (18)$$

根据灰色关联度 x_i 的值即可对各变电站的优劣程度进行评判, x_i 值越大表明在所有待评估对象中该变电站能效水平越高。

4 案例仿真分析

根据本文方法所开发的变电站能效评估软件已在湖南湘潭 220 kV 电压等级的景源变应用,为了便于分析比较,本文选择辽宁、湖南、山西不同地区的 3 个变电站进行调研、收集基础数据,其中 2014 年的能源供给和能耗情况如表 2 所示,表中的能耗率是指变电站年能耗和年供电量的比值。由表可知,景源变的供电量最大,但其能耗率仅为 0.36%,远小于另外 2 个变电站,其能效最高,马风变的能效最低。

表 2 2014 年 3 个变电站的供电量和能耗情况

Table 2 2014's power supply and energy consumption for three substations

变电站	年能耗/(kW·h)	年供电量/(kW·h)	能耗率/%
崔家变	5.69×10 ⁶	1.136 07×10 ⁹	0.50
景源变	4.11×10 ⁶	1.143 71×10 ⁹	0.36
马风变	5.41×10 ⁶	8.300 00×10 ⁸	0.65

根据第 2 节介绍的能效评估指标计算方法分别计算出各指标的样本值,如表 3 所示,然后采用第 3.1 节所介绍的方法对各指标进行标准化处理,其结果如表 4 所示。从 3 个变电站的基础指标数据对比分析可知,景源变的主变为自然冷却方式,空调能效水平较高,照明灯具含有较多的节能型灯具,照明和通风控制的自动化程度高,维护结构传热系数小,采暖度日数远少于其他变电站,这些特点表明该变电站的能效水平应该属于较高的范围。

以表 4 数据为基础,采用第 3.2 节介绍的灰色关联度计算方法最终得出各变电站的能效综合指标,3 个变电站的能效综合评估指标值分别是:崔家变为 0.56、景源变为 0.67、马风变为 0.51,也即评估结果表明景源变的能效最高,马风变的能效最低,崔家变的能效稍高于马风变。同时,由表 2 的数据可知,景源变能耗率最低,其次是崔家变,马风变能耗率最

表 3 变电站能效评估指标计算值
Table 3 Calculated values of substation energy efficiency evaluation indexes

指标	崔家变	景源变	马风变
主变冷却方式 A_1	0	1.000	0
空调能效比 A_2	3.400	3.600	3.200
照明灯具节能性能 A_3	0.630	0.850	0.670
控制柜温湿度调节装置节能性能 A_4	0.139	0.455	0.100
空调控制方式 A_5	0	0	0
照明控制方式 A_6	0.400	0.620	0.050
通风控制方式 A_7	0	0.400	0
控制柜温湿度控制方式 A_8	1.000	1.000	0.820
站用变节能性能 A_9	4.670	5.000	4.000
设备老化水平 A_{10}	1.063	1.025	1.138
负荷形状系数 B_1	1.070	1.059	1.060
主变经济运行 B_2	0.411	0.421	0.240
功率因数 B_3	0.952	0.970	0.979
三相负载不平衡系数 B_4	0.013	0.012	0.006
站用变经济运行 B_5	0.303	0.211	0.179
建筑朝向 C_1	1.000	1.000	0
建筑体型系数 C_2	0.270	0.240	0.310
围护结构传热系数 C_3	0.461	0.439	0.548
窗户隔热 C_4	2.000	1.000	1.000
窗户遮阳 C_5	0	1.000	0
采暖度日数 $D_1/^\circ\text{C}$	4488	1570	3020
空调度日数 $D_2/^\circ\text{C}$	262	560	373

表 4 标准化后的指标值
Table 4 Normalized values of substation energy efficiency evaluation indexes

指标	崔家变	景源变	马风变
主变冷却方式 A_1	0	1.000	0
空调能效比 A_2	0.680	0.720	0.640
照明灯具节能性能 A_3	0.630	0.850	0.670
控制柜温湿度调节装置节能性能 A_4	0.139	0.455	0.100
空调控制方式 A_5	0	0	0
照明控制方式 A_6	0.400	0.620	0.050
通风控制方式 A_7	0	0.400	0
控制柜温湿度控制方式 A_8	1.000	1.000	0.820
站用变节能性能 A_9	0.524	0.571	0.429
设备老化水平 A_{10}	0.843	0.938	0.655
负荷形状系数 B_1	0.860	0.882	0.880
主变经济运行 B_2	0.411	0.421	0.240
功率因数 B_3	0.952	0.970	0.979
三相负载不平衡系数 B_4	0.987	0.988	0.994
站用变经济运行 B_5	0.303	0.211	0.179
建筑朝向 C_1	1.000	1.000	0
建筑体型系数 C_2	0.730	0.760	0.690
围护结构传热系数 C_3	0.539	0.561	0.452
窗户隔热 C_4	0.250	0	0
窗户遮阳 C_5	0	1.000	0
采暖度日数 D_1	0.128	0.858	0.495
空调度日数 D_2	0.866	0.314	0.649

量能量,全国变电站数量巨大,其能耗不容忽视。为综合反映变电站能效水平,促进全社会节能工作的进一步实施,本文从能效的概念出发,分析变电站能效的含义,针对变电站能耗及能效的影响因素建立变电站能效评估指标及其计算模型。将灰色关联分析法和 AHP 相结合,建立变电站能效综合评估方法。通过实际变电站数据的仿真计算分析表明,所提方法可对变电站能效的高低进行排序,找出能效低的变电站,为变电站节能改造提供依据。

参考文献:

[1] 罗理鉴,黄少锋,江清楷. 智能变电站智能一次设备框架设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):120-124.
LUO Lijian,HUANG Shaofeng,JIANG Qingkai. Framework design of intelligent primary equipment in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):120-124.

[2] 柳国良,张新育,胡兆明. 变电站模块化建设研究综述[J]. 电网技术,2008,32(14):36-38.
LIU Guoliang,ZHANG Xinyu,HU Zhaoming. A survey on modularized construction of power substations[J]. Power System Technology,2008,32(14):36-38.

[3] WANG J,ZHU Y. Research on comprehensive energy saving evaluation of substation construction projects based on FAHP and TOPSIS[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences,2012,4(16):159-166.

[4] 朱柳慧,盛戈崑,白万建,等. 考虑热点温度的并列变压器经济安全优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):95-100.
ZHU Lihui,SHENG Gehao,BAI Wanjian,et al. Economic and safe operation of parallel transformer considering hottest-spot temperature[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):95-100.

[5] 陈星莺,史豪杰,刘健,等. 基于招投标策略的地区电网无功优化控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):1-6.
CHEN Xingying,SHI Haojie,LIU Jian,et al. The reactive optimal control based on bidding strategy in district power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):1-6.

[6] ISHIDA M,NAGATA T. Power system voltage and reactive power control by means of multi-agent approach[J]. Energy Procedia,2012,14:705-710.

[7] 咸日常,袁建华,梁玉,等. 电力变压器温升与冷却装置改造的技术经济分析[J]. 高压电器,2006,42(1):58-62.
XIAN Richang,YUAN Jianhua,LIANG Yu,et al. The economic and technical analysis of amelioration in power transformer temperature rising and cooling device[J]. High Voltage Apparatus,2006,42(1):58-62.

[8] 宗明,吴喜平,骆泽彬. 地源热泵在变电站的应用研究[J]. 华东电力,2011,39(5):747-749.
ZONG Ming,WU Xiping,LUO Zebin. Application of ground source heat pump in substations[J]. East China Electric Power,2011,39(5):747-749.

[9] 高赐威,罗海明,朱璐璐,等. 基于电力系统能效评估的蓄能用电技术节能评价及优化[J]. 电工技术学报,2016,31(11):140-148.
GAO Ciwei,LUO Haiming,ZHU Lulu,et al. The energy-saving assessment and optimization of energy storage and electricity utilization technology based on the energy efficiency evaluation of power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(11):140-148.

高,能效由高到低依次为景源变、崔家变、马风变。换言之,采用本文评估方法得出的变电站能效水平与实际测量、评估指标值分析得出的结论相同。

5 结语

变电站在完成电能输送任务时本身需要消耗大

- [10] 王玉磊,应黎明,陶海洋,等. 基于效能-成本的智能变电站二次设备运维策略优化[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):182-188. WANG Yulei, YING Liming, TAO Haiyang, et al. Operation-maintenance strategy optimization based on efficiency-cost sensitivity analysis for secondary equipment of intelligent substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 182-188.
- [11] MOTA SANTOS P, TROVAO J P, PEREIRINHA P G. Sustainable trolleybus system: rectifier substation technology Improvement for energy efficiency and operational cost reduction[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). Coimbra, Portugal: IEEE, 2014: 1-6.
- [12] CERAOLO M, GIGLIOLI R, LUTZEMBERGER G, et al. Use of electrochemical storage in substations to enhance energy and cost efficiency of tramways[C]// AEIT Annual Conference. Palermo, Italy: IEEE, 2013: 1-6.
- [13] 王睿,方洁,张可,等. 基于熵权和 AHP 的电能量模糊综合评价[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11): 21-25. WANG Rui, FANG Jie, ZHANG Ke, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on entropy and AHP[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2007, 44(11): 21-25.
- [14] 张雪平,殷国富. 基于层次灰色关联的产品绿色度评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 78-82. ZHANG Xueping, YIN Guofu. Research on evaluation method of product green degree based on layered grey relation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 78-82.
- [15] TAN X Y, REN Y M. Comprehensive evaluation of enterprise emergency response capability based on grey-AHP method[J]. Management and Service Science, 2010, 1(4): 24-26.
- [16] PATTERSON M G. What is energy efficiency?: concepts, indicators and methodological issues[J]. Energy Policy, 1996, 24(5): 377-390.
- [17] JANDA K B, BUSCH J F. Worldwide status of energy standards for buildings[J]. Energy, 1999, 19(94): 27-44.
- [18] 中国建筑科学研究院. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [19] YANG L, LAMB J C, TSANG C L. Energy performance of building envelopes in different climate zones in China[J]. Applied Energy, 2008, 85(9): 800-817.
- [20] 徐蕾, 刘力. 玻璃在建筑节能中的应用[J]. 建筑节能, 2008, 36(8): 50-52. XU Lei, LIU Li. Application of glass in the field of energy efficiency of buildings[J]. Building Energy Conservation, 2008, 36(8): 50-52.
- [21] 陈谦. 节能玻璃在建筑节能设计中的应用[J]. 节能, 2014, 36(6): 48-51. CHEN Qian. Application of glass in the field of energy efficiency of buildings[J]. Energy Conservation, 2014, 36(6): 48-51.
- [22] 周建平, 林韩, 温步瀛. 基于层次分析法与灰关联理论的输电网规划方案综合决策[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(9): 66-70. ZHOU Jianping, LIN Han, WEN Buying. Comprehensive decision-making of transmission network planning based on AHP-GRA[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(9): 66-70.

作者简介:



罗志坤

罗志坤(1971—),男,湖南岳阳人,博士研究生,研究方向为高级量测技术、节能技术(E-mail: zkluo8@sina.com);

刘潇潇(1983—),男,湖南娄底人,工程师,硕士,研究方向为智能电网及节能(E-mail: 190091108@qq.com);

陈星莺(1964—),女,江苏无锡人,教授,博士研究生导师,博士,从事配用电、电力市场及能源管控等领域的研究工作(E-mail: chenxyhhu@hhu.edu.cn);

丁孝华(1974—),男,江苏南京人,博士研究生,研究方向为配电网节能与优化运行、配电网智能调度与控制(E-mail: dxh_nari@163.com);

余 昆(1978—),男,重庆人,副教授,博士,研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制(E-mail: kun.yu@vip.sina.com)。

Energy efficiency evaluation index system and modeling method for substation

LUO Zhikun¹, LIU Xiaoxiao¹, CHEN Xingying², DING Xiaohua²,

YU Kun², WAN Quan³, HE Junmin³, LI Guang³

(1. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410000, China; 2. Jiangsu Engineering Research Center for Distribution & Utilization and Energy Efficiency, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. State Grid Hunan Energy Services Limited Company, Changsha 410000, China)

Abstract: The energy efficiency evaluation of substation is the basis for improving the energy efficiency of power system due to its great energy consumption during the power transmission. The substation energy efficiency and its influencing factors are analyzed and an energy efficiency evaluation index system for substation is then established in four aspects: electrical equipments, power system operation, building structure and operational environment, for which the corresponding calculation models are presented. AHP (Analytic Hierarchy Process) is applied to calculate the weight for each index and GRA (Grey Relation Analysis) is used to comprehensively evaluate the substation energy efficiency. The results of a simulative analysis based on the actual substation data show that, the proposed indexes and models for the substation energy efficiency evaluation based on the grey AHP can effectively reflect the level of substation energy efficiency.

Key words: electric substations; energy efficiency evaluation; index system; calculation model; comprehensive evaluation; influencing factors; grey relation analysis; analytic hierarchy process