

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.006

变电站并联电容器装置配置及运行状态评价方法

黄道友¹, 潘丽珠², 程石², 孙贺³

(1. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230061; 2. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 合肥 230601;
3. 安徽大学绿色产业创新研究院, 合肥 230088)

摘要:为了监测变电站并联电容器装置运行状态,综合评价并联电容器装置配置及运行状态,本文利用变电站生产管理系统设备资产信息和调度自动化系统电网电压无功运行数据,首先,根据并联电容器所涉及的电压无功相关指标,建立并联电容器装置配置及运行评价指标体系,其次,明确各指标物理意义及评估方法,然后考虑评价体系各指标劣化特点,提出基于劣化度的评价数据归一化处理方法,采用层次分析法与熵权值法相结合的综合评价方法对并联电容器装置配置及运行状态做出量化评价,将该方法应用于某地市公司变电站并联电容器装置的综合评价,评价结果符合装置实际运行状态,并且该方法可实现对并联电容器装置的实时评价,为变电站无功补偿的效果提升提供数据基础。

关键词:并联电容器装置; 配置; 运行状态; 评价体系; 综合评价

Configuration and Operation State Evaluation Method of Shunt Capacitor in Substation

HUANG Daoyou¹, PAN Lizhu², CHENG Shi², SUN He³

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230061, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

3. Green Industry Innovation Research Institute of Anhui University, Hefei 230088, China)

Abstract: For monitoring the operation condition of shunt capacitor at substation and comprehensively evaluating the configuration and operation condition of shunt capacitor device, the equipment asset information of the production management of the substation is used and the reactive power operation data of of network voltage of automation system of is dispatched in this paper. The configuration and operation evaluation index system of capacitor is set up firstly in accordance with related index of voltage which is involved by the shunt capacitor. Then, the physical meaning and assessment method of each index are clarified. After that, a normalization processing method of reactive power compensation data based on deterioration degree is proposed with consideration of the deterioration characteristics of each index of the evaluation system. The comprehensive evaluation method combining analytic hierarchy process and entropy weight method is used to quantitatively evaluate the configuration and operation condition of the shunt capacitor. Finally, the evaluation method is applied to the comprehensive evaluation of shunt capacitor at the substation of a local company and the evaluation result complies with the actual operation condition of the device. Moreover, the method can achieve real-time evaluation of the shunt capacitor and provide data foundation for the improvement of reactive compensation effect of substation.

Keywords: shunt capacitor; configuration; operation condition; evaluation system; comprehensive evaluation

0 引言

随着大电力网络数字化水平的不断提高,已实现发、输、配电及用户侧全景实时数据采集、传输以

及存储,产生了大量具有异构、实时、真实特征的数据,如何在线监测并有效评估并联电容器装置运行状态及补偿效果、及时发现电压无功不合格的原因并就装置容量配置及控制策略做出调整,成为配电

收稿日期:2023-01-26

网无功管理智能化发展的关键问题^[1]。无功补偿装置作为电力系统主要电力设备之一,合理安装配置无功补偿设备可以提高电压质量、降低网损、改善功率因数^[2],反之,可能会导致电压波动、谐振、动作开关频繁动作等负面影响危及电网安全稳定运行,利用电网现有监测数据对并联电容器装置运行状态进行实时监测并给出合理的综合评价,可提高无功补偿设备配置、监测和管理水平,提高电网安全运行水平和运维效率。

现有无功补偿运行标准和导则明确了无功补偿设备的配置原则,各级电压质量的合格范围及功率因数的合理运行水平,是我国电网电压和无功运行、规划和管理的重要指导依据,针对电能质量综合评估的研究中,国内外已有大量文献对评估指标处理、评估权重选取等方面展开研究^[3-4],但专门针对无功补偿装置本体和电网电压无功运行水平的评价方法相对较少,文献[5-6]针对配变低压无功补偿装置和高压配电网无功运行状态分别提出相应的指标评价体系,并对各不合格指标值进行溯源分析,该两个评价指标体系均倾向于电网电压无功运行状态评价,即无功补偿效果评价,且忽略了电网电力电子化带来的影响,随着冶金、化工等领域非线性设备的大量应用,电网丰富的谐波频谱大大增加了电网谐振风险,威胁电网的安全稳定运行。另外也有不少文献对电网其他主要电力设备综合评估方法开展了深入研究^[7-9],均引入了证据理论、神经网络、模糊理论等方法,在建立合理完善的指标评价体系基础上,对装置运行状态进行定量分析,借鉴已有低压并联电容器装置运行状态评估和电网其它电力设备运行状态评价方法,本文根据并联电容器所涉及的电压无功相关指标,建立并联电容器装置配置及运行评价指标体系,明确各指标评估方法,考虑并联电容器装置随时间劣化特点,提出基于劣化度的并联电容器数据归一化处理方法,最后采用层次分析法与熵权值法相结合的综合评价方法对并联电容器装置配置及运行做出量化评价。

1 并联电容器装置配置及运行评价指标体系

电网电压、无功运行状态评估指标体系是进行并联电容器设备配置及运行状态评估的基础,指标体系的优劣直接影响评估结果的好坏。根据变电站并联电容器装置配置及运行状态评价目的,本文综合评价包括装置本体和电网电压、无功运行水平评价两方面^[10-11],利用现有设备管理系统(power production management system, PMS)设备资产信息、数据采集

系统主要有数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统电网电压无功运行数据信息,建立并联电容器装置配置及运行评价指标体系,该评估指标体系主要由并联电容器容量配置、电压无功控制能力和装置状态三类一级指标构成,其结构见图1。

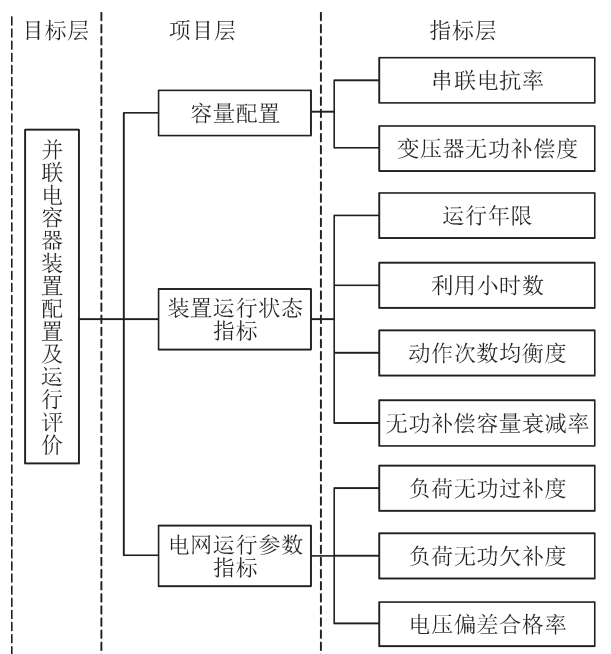


图1 并联电容器装置配置及运行评价指标体系
Fig. 1 Configuration and operation evaluation index system of shunt capacitor

1.1 无功补偿容量配置

无功补偿容量配置评估指标主要用于评估并联电容器安装容量是否满足当前条件下无功考核要求。根据无功补偿相关标准,对于不同电压等级和运行环境变压器无功补偿补偿度不同。无功补偿度 C_{CR} 计算公式为

$$C_{CR} = (Q_C / S_T) \times 100 \quad (1)$$

式中: Q_C 为并联电容器安装容量; S_T 为变压器容量。

串联电抗率评估指标主要用于评估系统是否存在谐振风险,通常系统存在多个串并联谐振点,当系统中存在谐振点附近的背景谐波或非线性负荷谐波时会严重危及电网和电力设备的安全稳定运行。可以根据变电站谐波频谱分布和串并联谐振点主观判断是否存在谐振风险。

1.2 装置运行状态指标

装置运行状态评估指标主要反应并联电容器装置运行状态及无功控制能力。并联电容器在实际的运行过程中高温、过压、过流等运行均会使得电容值下降,缩短并联电容器使用寿命,故随着投运年限的增长,并联电容器各项性能逐渐恶化直至寿命

结束^[12]。运行年限和无功补偿容量衰减率反映了装置本体老化程度,老化程度越高运行风险越大^[13]。利用小时数反应装置使用率,使用率越低资源浪费越严重。并联电容器装置开关投切情况反应电压无功控制能力,一般情况下按照高串联电抗率补偿支路先投后切,低串联电抗率支路后投先切,各补偿支路均衡投切的原则进行投切。考虑并联电容器本体老化程度和电压无功补偿效果设置如下评价指标。

投切率 C_S 公式为

$$C_S = n_s / N \times 100 \quad (2)$$

动作次数均衡度 C_{SD} 公式为

$$C_{SD} = (n_{s,max} - n_{s,min}) / N \times 100 \quad (3)$$

利用小时数 C_T 公式为

$$C_T = \int q_c dt / Q_C / T \quad (4)$$

补偿容量衰减率 C_R 公式为

$$C_R = (Q_C - q_{c,max}) / Q_C \times 100 \quad (5)$$

式中: T 为持续时间; n_s 为投切次数; $n_{s,max}$ 、 $n_{s,min}$ 为投切次数最大值和最小值; N 为投切限值; q_c 为并联电容器实际在线监测无功补偿容量运行序列; $q_{c,max}$ 为监测时间内无功补偿容量最大值。

1.3 电网运行参数指标

变电站并联电容器装置主要参与电网电压无功控制,故电网电压无功运行状态可反应变电站无功补偿效果。无功功率注入系统抬升母线电压,负荷无功欠补使得系统无功缺口较大反应为功率因数较低,故可通过 SCADA 系统电压无功等监测运行数据对无功补偿效果进行分析,主要根据并联电容器接入母线的总进线无功潮流方向、功率因数大小分析判断无功补偿过补、欠补度。

无功补偿过补度 C_{OC} 公式为

$$C_{OC} = (t|_{q_c < 0}) / T \quad (6)$$

无功补偿欠补度 C_{UC} 公式为

$$C_{UC} = (t|_{pf < PF \text{ 且 } q_c > 0}) / T \quad (7)$$

式中: T 为总运行时间; pf 为监测时段功率因数序列; PF 为功率因数限值取值。

电压质量是电力系统电能质量的重要指标之一,他的好坏与电力系统无功潮流分布是否合理密切相关^[14]。国标中对电压偏差计算及限值做出了明确规定,理论上进行电压偏差评估时应采用标准给出的限值,而 AVC 系统通常有地区自定义的运行电压上、下限值,为了保证电力系统有效运行,本文以

AVC 控制系统给出电压上下限作为电压偏差限值。

并联电容器装置接入母线电压偏差合格率 U_{OC} :

$$U_{OC} = t|_{U_q} / T \times 100 \quad (8)$$

式中, $t|_{U_q}$ 为电压合格持续时间。

2 并联电容器装置配置及运行评价模型

2.1 劣化度数据归一化处理

为消除多类型指标量纲不同造成的影响,需首先对三级指标集进行标准化处理。通常数据序列有“极大型”、“极小型”、“中间型”和“区间型”的不同,为了便于评价结果的等级划分,本文利用劣化度计算方法对各类状态参量进行统一量化评估,便于无功补偿统一评价函数的建立^[15],而状态参量需要则需要根据实际的物理意义做特别处理。通过第 1 章各指标定义可见,其中无功补偿度、串联电抗率为状态参量,其它指标均为极大型或者极小型参量。

无功补偿度不会随着时间而劣化,只有设计值是否合理,采用梯形隶属度函数进行无功补偿归一化处理,计算公式如下。

$$K_i = \begin{cases} 0, & D_i > D_4 // D_i < D_1 \\ 1, & D_2 \leq D_i \leq D_3 \\ \frac{D_i - D_1}{D_2 - D_1}, & D_1 \leq D_i < D_2 \\ \frac{D_i - D_3}{D_4 - D_3}, & D_3 < D_i \leq D_4 \end{cases} \quad (9)$$

式中: D_i 为无功补偿度; $[D_2, D_3]$ 为标准推荐值; $[D_1, D_2]$ & $[D_3, D_4]$ 为勉强可接受范围, K_i 为无功补偿度归一化结果。

串联电抗率为状态参量,设置为合理和不合理,采用经典 0-1 隶属度函数进行处理,无谐振则为 1,有谐振则为 0。

并联电容器装置配置及运行数据参量评价指标状态相对劣化度定义按照“极大型”、“极小型”进行区分,统一量化为取值越大,配置及运行越优。

并联电容器装置的数据参量评价指标随时间动态变化,本文采用指数函数进行归一化处理,认为在劣化过程中取值变化速度大于正常健康运行过程,数据参量计算方法如下所示:

$$\begin{cases} y_{\max i} = e^{-\frac{(3 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}})^2}{2}}, & \text{极小型} \\ y_{\min i} = 1 - e^{-\frac{(3 \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}})^2}{2}}, & \text{极大型} \end{cases} \quad (10)$$

式中： x_i 为指标值； $x_{\max}$ 为 x_i 系列指标值运行范围的最大值； $x_{\min}$ 为 x_i 系列指标值运行范围的最小值， $y_{\max i}$ 、 $y_{\min i}$ 分别为归一化结果。

其中极小型数据类型以运行年限为例，假设运行年限范围为 1~12 年，运行年限越高归一化结果越低，按照式 10 中极小型归一化处理见图 2。极大大型数据类型以电压合格率为例，假设电压合格率范围为 60~100，电压合格率越高归一化结果越高，按照式 10 中极大大型归一化处理见图 3。

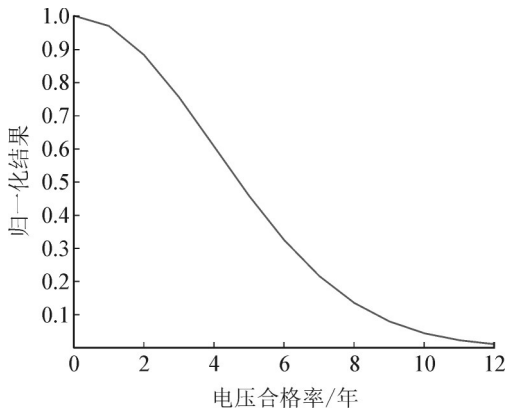


图2 极小型指标归一化结果
Fig. 2 Normalization results of very small indexes

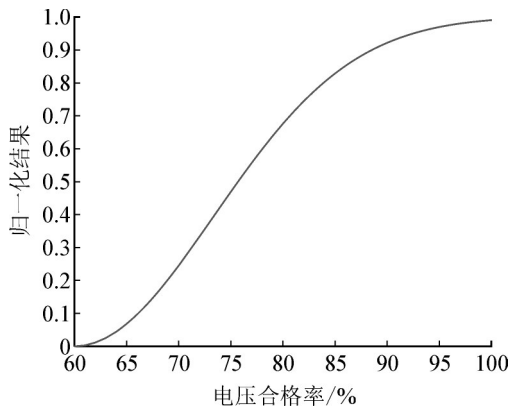


图3 极大型指标归一化结果
Fig. 3 Normalization results of very large indexes

考虑实际电网各指标值，指标运行范围设定情况推荐值见表 1，超出范围则归一化结果取值为 0。

表1 并联电容器装置配置及运行状态评价指标变化范围
Table 1 Variation range of configuration and operation state evaluation index of shunt capacitor

指标	范围
运行年限/年	[0, 12]
利用小时数/(Mvar/h)	[0, 1]
动作次数均衡度	[0, 1]
补偿容量衰减率/%	[0, 15]
无功补偿过补度/%	[0, 40]
无功补偿欠补度/%	[0, 40]
电压偏差合格率/%	[60, 100]

2.2 建立综合权重

层次分析法适合于具有多层次结构的多指标决策问题，但其具有主观随意性及一定的误差，需要通过一致性校验^[16]，而熵权法属于客观赋权法，可以有效弥补上述不足。在确定指标及评判矩阵的情况下，各指标之间的信息量即可通过信息熵来度量，信息熵值越小则该指标的信息量越大，即该指标的权值越大^[17]。应用熵值法可以使评价结果更符合实际情况。本文采用层次分析法与熵值法相结合的评估方法，计算指标体系内各单项指标的权重。

利用信息权重修正层次分析法得到的权重，得到综合权重 W 公式为

$$W=(w_i+g_i)/2,i=1,2,3,\cdots$$

(11)

式中： w_i 为层次分析法权重序列； g_i 为熵权法权重序列。

无功补偿配置及运行状态属于模糊概念，模糊子集之间存在中间过渡的模糊性。在论域上定义 4 个模糊子集 $V=(v_1, v_2, v_3, v_4)$ ，分别表示优、良好、注意、严重，并联电容器装置四类状态分级限值及应对策略见表 2。

表2 并联电容器装置配置及运行状态评价等级划分
Table 2 Configuration and operation condition evaluation level classification of shunt capacitor

状态等级	分值范围	应对决策
优	[0.9,1]	设备正常,可延长检修周期
良好	[0.8,0.9)	设备正常,正常检修
注意	[0.6,0.8)	实时监测,优先安排检修
严重	[0,0.6)	尽快安排检修

3 算例分析

以某地市公司 220 kV 变电站为例，选择多样本中的 5 组装置作为代表，分别定义为 1#~5# 电容器，对其无功补偿配置及运行进行评价。运行数据涉及三级指标均以日为单位，时间间隔 5 min（全天 288 个监测数据）的统计结果，该地区无功补偿配置及运行数据见表 3，采用劣化度数据归一化处理结果见表 4。

可以看出该地市公司变电站并联电容器装置存在投运年限久，装置补偿容量衰减率较大问题，而除 1#电容器组无功补偿度略小于推荐值，其他几组装置配置均较为合理。

采用层次分析法与熵值法相结合的评估方法，确定指标体系各项指标主观（层次分析法）权重和客观（熵值法）权重，结果见表 5。其中主观权重可根据重要度不同设置比较矩阵，文中将重要标度分

表3 省某地市公司变电站并联电容器装置配置及运行统计表
Table 3 Configuration and operation statistics of shunt capacitor at a substation in one local city

对象	串联 电抗率/%	无功补 偿度/%	运行年 限/年	利用小时 数/(Mvar/h)	动作次数 均衡度	补偿容量 衰减率/%	无功补偿 过补度/%	无功补偿 欠补度/%	电压偏差 合格率/%
1#电容器	6.00	16.68	6.50	0.24	0.38	15.00	0.94	16.25	80.76
2#电容器	5.00	19.20	2.00	0.26	0.67	1.00	6.95	0.00	99.53
3#电容器	6.00	24.76	5.80	0.12	0.00	10.00	44.32	0.03	80.03
4#电容器	5.00	19.05	6.25	0.31	0.38	12.00	16.27	36.90	94.70
5#电容器	5.00	30.00	8.00	0.41	0.00	20.00	4.67	5.59	96.92

表4 变电站并联电容器装置配置及运行数据归一化处理后统计表
Table 4 Configuration of shunt capacitor and normalized statistics of operation data at a substation

对象	串联 电抗率/%	无功 补偿度/%	运行 年限/年	利用小时数/ (Mvar/h)	动作次数 均衡度	补偿容量 衰减率/%	无功补偿 过补度/%	无功补偿 欠补度/%	电压偏差 合格率/%
1#电容器	1.00	0.34	0.27	0.23	0.52	0.01	1.00	0.48	0.70
2#电容器	1.00	1.00	0.88	0.26	0.13	0.98	0.87	1.00	0.99
3#电容器	1.00	1.00	0.35	0.06	1.00	0.14	0.00	1.00	0.68
4#电容器	1.00	1.00	0.30	0.35	0.52	0.06	0.47	0.02	0.97
5#电容器	1.00	1.00	0.14	0.53	1.00	0.00	0.94	0.92	0.98

为1-10,代表同等重要到极端重要,随着数值的增大代表重要程度增加,按照表5项目层按照项目顺序重要程度为 $A=[2\ 1\ 4]$,指标层指标顺序本文所列重要程度矩阵为 $A=[3\ 3\ 2\ 1\ 1\ 5\ 8\ 5\ 10]$,实际应用中可根据侧重点自行设置重要程度。通过层次分析法和熵值法计算权重结果见表5。

表5 各单项指标及分层指标权重
Table 5 Weights of individual indicators and hierarchical indicators

项目层	主观 权重	指标层	主观 权重	客观 权重	综合 权重
无功补偿 容量配置	0.29	串联电抗率	0.50	0.00	0.25
		无功补偿度	0.50	1.00	0.75
		运行年限	0.22	0.27	0.25
装置运行 状态	0.14	利用小时数	0.11	0.17	0.14
		动作次数均衡度	0.11	0.10	0.11
		无功补偿容量衰减率	0.56	0.45	0.50
电网运行 状态	0.57	无功补偿过补度	0.35	0.28	0.31
		无功补偿欠补度	0.22	0.28	0.25
		电压偏差合格率	0.43	0.44	0.44

根据各指标权重计算结果,计算各并联电容器组得分见表6,可以初步看出,该地区并联电容器装置配置均较为合理,但装置本体运行情况和无功补偿效果却较差。以1#电容器为例,其本体运行状态和电网运行状态均得分较低,该装置存在使用年限长、利用率低、过补严重、电压合格率较低问题,参考问题表象可有目的地进一步分析具体原因,进而提出相应的整改方案。

表6 各电容器组得分
Table 6 Score of each capacitor bank

对象	无功补偿 容量配置	装置运行 状态	电网运行 状态	总得分
1#电容器	0.50	0.16	0.74	0.59
2#电容器	1.00	0.76	0.95	0.94
3#电容器	1.00	0.27	0.55	0.64
4#电容器	1.00	0.21	0.58	0.64
5#电容器	1.00	0.22	0.95	0.86

4 结语

本文充分利用变电站生产管理系统设备资产信息和调度自动化系统电网电压无功运行数据,深度挖掘变电站电网电压、无功运行水平和无功补偿设备运行状态,丰富完善无功补偿状态及运行评估指标体系,建立变电站并联电容器装置配置及运行评估方法。评价方法根据各指标物理特性选择劣化度和隶属度数据归一化方法,使运行数据和状态参量得到有效结合,且尽量多的保留数据本身信息,综合主观和客观评价因素,根据在线运行数据分析并联电容器装置运行状态,为装置运维和电压无功控制优化提出一定的数据借鉴。

参考文献

[1] 张智光,倪秋龙,廖培,等. 计及新能源消纳的地区电网无功电压优化控制策略[J]. 浙江电力,2023,42(1):46-53.
ZHANG Zhiguang, NI Qiulong, LIAO Pei, et al. An optimal reactive voltage control strategy for regional power grids considering new energy consumption[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(1):46-53.

- [2] 张利生. 电力网电能损耗管理及降损技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [4] 程志友, 刘荡荡, 吴吉, 等. 基于集对分析与可变模糊集的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1950-1956.
CHENG Zhiyou, LIU Dangdang, WU Ji, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on set pair analysis and variable fuzzy sets[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1950-1956.
- [5] 颜伟, 陈思柔, 沈海江, 等. 配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 25-31.
YAN Wei, CHEN Sirou, SHEN Haijiang, et al. Index system of operational status evaluation for reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 25-31.
- [6] 颜伟, 田志浩, 余娟, 等. 高压配电网无功运行状态评估指标体系[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 104-109.
YAN Wei, TIAN Zhihao, YU Juan, et al. An index system to assess reactive power operation in high voltage distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 104-109.
- [7] 梁朔, 秦丽文, 李春华, 等. 基于风险评估的配电设备状态检修决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 47-52.
LIANG Shuo, QIN Liwen, LI Chunhua, et al. Condition-based maintenance decision-making method for distribution equipment based on risk assessment[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2019, 31(1): 47-52.
- [8] 姚建锋, 丁宇涛, 周平, 等. 基于变权重系数和雷达图的变压器综合状态评估[J]. 变压器, 2023, 60(5): 23-30.
YAO Jianfeng, DING Yutao, ZHOU Ping, et al. Transformer comprehensive status evaluation based on variable weight coefficient and radar chart[J]. Transformer, 2023, 60(5): 23-30.
- [9] 曾磊磊, 张宇, 曾鑫, 等. 合绝缘子硅橡胶伞裙老化状态评估方法综述[J]. 电瓷避雷器, 2022(2): 139-145.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, ZENG Xin, et al. Aging state evaluation methods for silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(2): 139-145.
- [10] 电力网无功补偿配置技术导则: DL/T 2114—2020[S]. 2020.
Technical guidelines for reactive power compensation configuration of power network: DL/T 2114—2020[S]. 2020
- [11] 并联电容器装置设计规范: GB 50227—2008[S]. 2008.
Code for design of shunt capacitor devices: GB 50227—2008[S]. 2008.
- [12] 沈文琪. 对高压并联电容器使用寿命的估算[J]. 电力电容器, 2005(3): 25-26.
SHEN Wenqi. Estimation on the expected operation life of high-voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 2005(3): 25-26.
- [13] 沈文琪. 温度、电压、谐波、涌流等对电容器寿命的影响[J]. 电力电容器, 2005(2): 6-8.
SHEN Wenqi. Influence of temperature, voltage, harmonic and inrush transient current on power capacitor Life expectancy[J]. Power Capacitor, 2005(2): 6-8.
- [14] 罗曼, 朱磊. 区域电网无功优化控制系统的研究和应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6): 29-34.
LUO Man, ZHU Lei. Research and application of reactive power optimization and control system in regional grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(6): 29-34.
- [15] 李宁波, 徐之文, 张映鸿, 等. 继电保护装置运行状态量化评估方法研究[J]. 机电工程技术, 2013, 42(6): 130-133.
LI Ningbo, XU Zhiwen, ZHANG Yinghong, et al. The study of quantitative status assessment for protective devices[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2013, 42(6): 130-133.
- [16] 修晓青, 唐巍, 李建林, 等. 基于层次分析法的储能配置综合评估技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 72-78.
XIU Xiaoqing, TANG Wei, LI Jianlin, et al. Comprehensive evaluation technology of energy storage configuration based on analytic hierarchy process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 72-78.
- [17] 孙辉, 张国庆, 高博, 等. 采用组合赋权法的智能变电站继电保护设备状态模糊综合评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 11-16.
SUN Hui, ZHANG Guoqing, GAO Bo, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of relay protection equipment state in intelligent substation using combined weighting method[J]. Electric Measuring Instrument, 2020, 57(7): 11-16.

作者简介:

黄道友(1968—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网设备管理。E-mail: hdymba@163.com。

程石(1982—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网节能分析与控制。E-mail: tracy01@163.com。

潘丽珠(1976—), 女, 高级工程师, 研究方向为电网节能分析与控制。E-mail: panlizhu@163.com。

孙贺(1990—), 女, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: sunny1990he@163.com。