

# 基于大数据的发电机组无功运行考核评价方法研究

邢晶<sup>1</sup>, 武江<sup>2</sup>, 刘海涛<sup>1</sup>, 周博<sup>1</sup>, 孙为民<sup>1</sup>, 张隽<sup>1</sup>, 白静洁<sup>2</sup>, 马富<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司, 北京 西城 100054;

2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 海淀 100192)

**摘要:**在电力传输过程中,存在输电线路、变压器、母线等电气设备出现损耗从而降低供电效率的情况,目前常用无功补偿的方式来解决此问题。因此无功补偿装置的性能对电力系统安全稳定运行具有十分重要的作用。但是目前对于无功运行管理方面缺乏高效的手段,亟需完整科学的方法进行指导。针对上述问题和需求,本文首先应用大数据技术构建了支撑评价指标计算和分析的数据层,根据发电机组无功运行考核的实际业务需求分析提出了完整的评价指标体系,包括设备可用率、设备折旧率和设备故障率三个二级指标,最后提出了层次分析法与熵权值法相结合的综合评价方法。应用本文提出的指标对并网发电机组的无功运行情况进行考核评价,能够从客观角度反映机组的实际运行情况,为电网运行专业管理人员提供辅助决策。

**关键词:**无功补偿;大数据技术;评价指标;评价方法

**文章编号:**2096-4633(2019)06-0052-06 **中图分类号:**TM31 **文献标志码:**B

无功补偿<sup>[1]</sup>,全称无功功率补偿,是一种在电力供电系统中起提高电网的功率因数的作用,降低供电变压器及输送线路的损耗,提高供电效率,改善供电环境的技术。所以无功功率补偿装置在电力供电系统中处在一个不可缺少的、非常重要的位置。合理的选择补偿装置,可以做到最大限度的减少电网的损耗,使电能质量提高。反之,如选择或使用不当,可能造成供电系统电压波动、谐波增大等诸多问题。

电压质量是电能质量的重要指标之一。电力系统的无功补偿与无功平衡是保证电压质量的基本条件,对保证电力系统的安全稳定与经济运行起着重要的作用<sup>[2]</sup>。为保证电压质量,降低电网损耗,向用户提供电压质量合格的电能,国家电网公司下发了《国家电网公司电压质量和无功管理规定》(国家电网生[2009]133号)<sup>[3]</sup>,为指导无功运行管理提供了技术标准和考核依据。

当前我电力系统功率因数普遍偏低<sup>[4]</sup>,大量无功功率需要在发电机组侧补偿,同时由于电网的复杂性和分布的广泛性,无功补偿装置的分布也极为不合理,同时由于缺少科学、合理的指导方法,无功装置的利用率严重不足。无功运行中存在的这些问题加剧了电网电压偏差,阻碍了电力系统稳定性的

提高和发电企业经济效益的进一步提升。因此,需要在现有管理规定或标准的基础上,应用大数据技术和考核评价方法,从无功容量配置、电压运行水平、功率因数要求等多个方面构建对无功运行的完整评价体系。

本文首先分析了发电侧大数据现状及应用需求,结合目前大数据技术的应用成果,提出了三层结构的评价体系架构,包括数据层、指标层、应用层,并对每层解决的问题和方法进行了详细阐述:数据层通过应用大数据技术实现海量异构发电侧电力大数据的汇聚、存储,形成可高效获取、计算的数据集。指标层通过对现有考核评价需求和实际业务应用的分析,构建完整的指标体系,实现可量化、可管理。应用层通过构建科学、合理的评价方法实现无功运行考核的综合评价。通过上述工作,真正实现电网无功运行管理工作的科学化、精细化。

## 1 总体架构

随着特高压大电网不断发展,电网越发复杂,对发电侧的电压水平要求也越来越高。智能传感监测技术、网络通信技术的成熟应用使得大量的监控信息汇聚到业务系统,发电侧的数据增长迅猛,目前在数量级上已经形成了电力发电侧大数据。大数据技

术致力于从海量数据中挖掘数据价值,提升业务服务能力。如何从现有的电力大数据中挖掘有价值信息,实现数据的增值与高效利用,从而服务于提升电力系统安全稳定运行水平,已成为目前应用大数据技术分析电力大数据的主要方向。对于无功运行考核评价工作,由于电力输送过程中出现的电压波动及不稳定因素,需要实时对发电机组无功补偿装置投切来调节无功功率,但由于其具有分散性,给电网整体调压及装置评价带来了挑战。因此,本文结合当前大数据技术的水平和无功运行评价的应用需求,提出了基于大数据的发电机组无功运行考核评价系统架构,共分为三层,自下而上包括数据层、指标层、应用层。

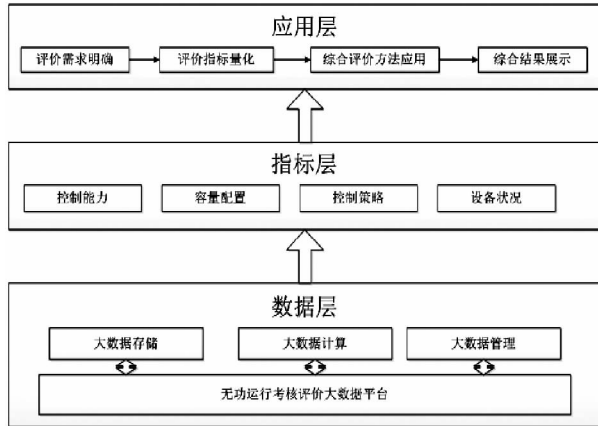


图1 基于大数据的发电机组评价结构

Fig. 1 Evaluation structure of big data based generator set

数据层主要实现电力大数据平台构建,大数据存储、计算及管理。电力大数据平台通过对各种智能电力设备进行实时数据采集,将与无功运行评价相关的电网运行数据、发电企业内部及外部数据进行汇聚、整合接入,结合大数据存储技术实现多源异构海量数据资源的统一建模和统一存储,应用大数据计算和管理技术实现数据的高效计算和便捷使用,为指标层数据获取提供支撑,保证目标数据的精准与快速获取。

目前大数据技术<sup>[5]</sup>较成熟的存储技术是基于Hadoop的文件系统(HDFS),HDFS文件系统具有分布式特性,支持高吞吐量数据访问,在数据存储和数据访问方面都适合作为电力大数据平台的存储框架<sup>[6]</sup>。大数据技术的核心是计算技术,目前大数据的计算技术主要是MapReduce计算框架,该框架最大的优势是其分布性与并发性,可以利用资源和分解计算任务,从而提高数据处理的效率,通过使

用该框架可以实现海量的电力大数据并行化处理,为数据的快速获取与分析奠定基础,为指标层的各类数据访问需求提供保障。

## 2 无功评价指标的构建

指标层根据电网无功运行过程中出现的各类实际问题,通过梳理、分析提炼指标类型及单项指标,从而构建完整的指标体系。指标体系应具备指标可量化、具有明确的定义、覆盖面广等特点,本文在数据层采用大数据技术构建了电力大数据平台,各项指标计算中可充分利用其优势,确保得到质量好、可靠性高的指标体系。

依据上述评价指标构建规则,通过梳理实际考核评价问题和需求,文本提出了指标层的指标体系,分为4类一级指标,每类一级指标下面包含若干二级指标。

表1 发电机组无功运行评价指标

Tab. 1 Evaluation index of generator group reactive operation

一级指标	二级指标
控制能力	电压波动合格率、进相偏差、迟相偏差
容量配置	总容量补偿率、单组容量配置不当率、容量利用过低率
控制策略	无功投切不当率、无功动作超标率、谐波电流超标率、谐波电压超标率
设备	设备可用率、电容器老化率、电容器故障投切率

### 2.1 容量配置

容量配置指标<sup>[7]</sup>主要从总容量配置、单组容量配置、容量利用率三个方面评价发电机组的无功补偿配置与利用情况,这些指标主要针对无功补偿设备的规划、改造工作是否得当、合理。

(1)总容量配置。无功装置的总量配置情况需要满足相关技术导则<sup>[8]</sup>的要求,通过总容量配置指标用于反映配置与要求的匹配度。

(2)单组容量配置。除了总容量配置需要满足技术导则要求外,对于单组容量配置也有相应的要求,用于反映单组容量配置的合理性。

(3)容量利用率。用于检验容量配置后实际工作中是否充分利用。

### 2.2 控制能力

无功控制能力指标主要从电压波动合格率、进相偏差、迟相偏差三个方面进行评价。

(1)电压波动合格率。电压是电网无功控制能力的重要体现,合理的无功补偿措施能够有效地维系电网的电压水平。电压波动合格率就是针对无功补偿对电网电压的影响而提出的反映电压波动情况的指标。

(2)进相偏差。当母线电压越过标准电压上限阈值,并且持续一定时间,则认为母线电压不合格,机组应该多吸收无功,即进相运行。设置一个进相最大无功调节能力,对机组的实际无功与进相最大无功调节能力之差做无功积分电量即进相偏差。

(3)迟相偏差。当母线电压越过标准电压下限阈值,并且持续一定时间,则认为母线电压不合格,机组应该多发出无功,即迟相运行。设置一个迟相最大无功调节能力对机组的实际出力与迟相最大无功调节能力之差做无功积分电量即迟相偏差。

### 2.3 控制策略

控制策略指标主要包括三个二级指标:策略有效率、无功动作异常率、谐波异常率。通过这三个二级指标可以对电网运行过程中无功策略采取的是否得当进行综合评价。

(1)策略有效率。无功控制过程中会出现无功设备投切不合理的情况,不当的投切控制策略会造成电压和功率因数无法改善,难以达到电网稳定运行的条件,因此将无功设备的不当投切情况作为考核无功策略有效率的重要条件。

(2)无功动作异常率。无功补偿设备的动作频率在合理规定的频率范围内无论对于调压还是无功设备寿命都具有积极作用。但是过于频繁的动作则会体现出无功设备使用的不恰当性,同时也可在一定程度上反映动作触发机制是否合理。

(3)谐波异常率。在无功调节过程中,异常的谐波现象会导致无功补偿设备的损坏,严重影响电网无功运行环境。在无功设备操作中,常用串接的电抗器来消除谐波,电容器投放顺序与串联电抗器的电抗值有可能出现不匹配的情况,因此用谐波异常率来反映无功设备投放顺序的异常情况。

### 2.4 设备状况

无功补偿装置作为电网安全稳定运行的重要调节方式,设备本身的健康状况对于无功调节的

效率和使用寿命都具有重要影响,本文将其作为一项重要指标纳入到无功运行考核评价体系中,应用大数据技术为科学合理评估无功设备健康状况提供可靠指导。本文的设备状况指标包含三个二级指标。

(1)设备可用率。指无功设备整体的健康情况,以衡量设备健康情况的主要参数作为量化评价标准,是对无功设备运行可靠性评价的重要指标。

(2)设备折旧率。无功设备在使用过程中受到电压、频率、电流、温度等内部因素以及湿度、雷电等外部因素的多重影响会出现设备不同程度的老化现象,设备老化本身对于设备的正常使用会造成影响,需要借助大数据技术对其型号、基本电气量等因素综合评估,从而达到精确评估。

(3)设备故障率。电容器发生投切故障会影响对无功控制策略的有效执行,产生不必要的无功损失。

## 3 综合评价方法

本文依据主观经验与客观数据对评价结果的影响,提出了一种基于 AHP 层次分析法与熵权值法的综合评价方法,采用 AHP 层次分析法确定指标的主观权重,利用熵权法<sup>[9]</sup>确定指标的客观权重,通过综合权重计算方法求得指标的基本权重,最后根据评价结果计算方法得到最终的评价得分。

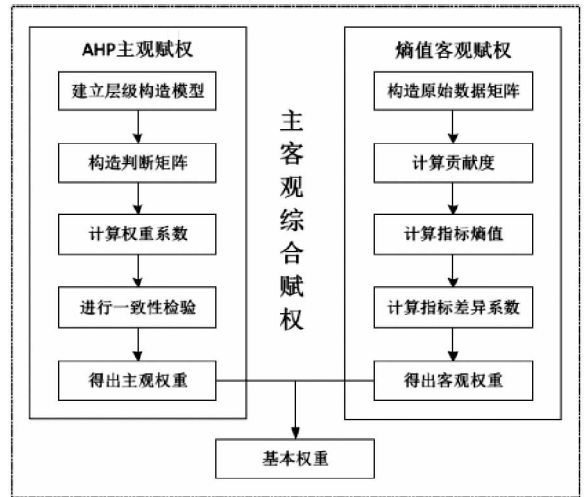


图 2 基本权重设计流程

Fig. 2 Design process of basic weight

### 3.1 权重计算

采用 AHP 确定指标的主观权重;基于历史数

据,利用熵值法确定指标的客观权重;通过主客观综合赋权,得出指标的基本权重。

### 3.1.1 AHP 层次分析法

AHP 是一种将指标内在关系进行深入分析之后,通过构建层次结构模型,利用较少的定量信息使得复杂问题层次化、数学化的决策方法。将同一指标下的所有指标进行两两比较,确定该层级中的指标相对于上一层指标的重要程度(即权重),然后逐层合成指标权重,得到最底层指标相对于最高层指标的综合权<sup>[10-13]</sup>重。

(1)构造判断矩阵。AHP 按照指标层级分别构造判断矩阵,对于从属于上一级的每个指标,用两两比较法构造判断矩阵,直到最后一级。

$$A = \{a_{ij}\} n \times n \quad (1)$$

式中, $a_{ij}$ 表征指标  $i$  和  $j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ) 的相对重要程度,由这种方法得到的判断矩阵  $A$  具有如下性质:

$$\begin{cases} a_{ij} > 0 \\ a_{ij} = 1 \\ a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \end{cases} \quad (2)$$

(2)计算权重系数。根据上一步得到的判断矩阵  $A$ ,求出指标相对于上一级指标的指标权重。在计算权重时,先假设判断矩阵具有一致性,即  $a_{ij} \times a_{jk} = a_{ik}$ 。计算出每一个判断矩阵的权重系数  $\omega$ ,先按行将各指标连乘并开  $n$  次方,即求得各行指标的几何平均值  $\omega'$ ,进行归一化处理,即求得指标  $x_j$  的权重系数为  $\omega_j$ ,则  $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  为各指标对于同一上级指标的相对权重。

(3)进行一致性检验。由于判断矩阵不完全一致,因此,需对判断矩阵进行一致性检验。若检验通过,特征向量(归一化)即为权向量;若不通过,则应考虑重新构造判断矩阵。

首先计算原始矩阵的最大特征根  $\lambda_{max}$ ,利用最大特征根计算一致性检验指标:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

对于阶数很大的判断矩阵,上述一致性检验方法的适用性将有所降低,需要对一致性指标  $CI$  进行修正,这里引入平均随机一致性指标  $RI$ ,将其作为一致性检验的对标值;引入一致性比率指标  $CR$ ,对判断矩阵的一致性准则进行修正, $CR$  定义式如下:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

当  $CR < 0.1$  时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的;当  $CR > 0.1$  时,认为判断矩阵偏离一致性,应对判断矩阵作适当修正。

### 3.1.2 熵权值法

熵表示指标所包含信息量的大小。就一个指标样本而言,有序化程度越高,样本方差越小,它所包含的信息量越小;反之,无序程度越高,样本方差越大,它所包含的信息量越大。在评价指标中,指标包含信息量的多少能够用指标权重的大小来表示。信息量越大,指标权重越高<sup>[14-15]</sup>。熵权值法的优点在于完全从数据本身的离散程度来定义其数据的价值和权重。熵权值法的计算步骤如下:

(1)构造原始数据矩阵。收集指标原始数据,进行标准化处理。将各类型指标转化为极大型指标,统一评价标准。被评价对象的历史数据由下列矩阵表示:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nm} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当某个指标属性下各个历史年的贡献度趋于一致时, $e_i$  趋于 1。由于贡献度趋于一致,说明该指标属性在决策中不起作用,特别是当完全相等时,可以不考虑该目标属性,即可认为该指标的权重为 0。

(2)计算不同历史年的贡献度。同一指标下,计算不同历史年所占的比重,作为该年贡献度,计算公式如下:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (6)$$

式中, $P_{ij}$ 表示第  $i$  指标属性下,第  $j$  历史年的贡献度。

(3)计算指标的熵值。熵值  $e_i$  表示所有评价年对第  $i$  个指标的贡献总量,公式如下所示:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (7)$$

(4)计算指标的差异性系数。差异性系数  $g_i$  表示第  $i$  个指标各历史年贡献的不一致程度,公式如下所示:

$$g_i = 1 - e_i \quad (8)$$



显然,  $g_i$  越大, 该指标应越受重视。

(5) 确定权重系数。权重系数  $W_i$  为经过归一化处理之后的权重系数, 公式如下:

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{i=1}^n g_i} \quad (9)$$

### 3.1.3 组合赋权

组合赋权普遍采用线性加权组合法, 计算公式为:

$$\theta_i = \alpha v_i + (1 - \alpha) \mu_i \quad (10)$$

式中,  $v_i$  表示主观权重向量,  $\sum v_i = 1$ ;  $\mu_i$  表示客观权重向量,  $\sum \mu_i = 1$ ;  $\theta_i$  表示组合权重向量,  $\sum \theta_i = 1$ ;  $\alpha$  表示主观赋权方法的重要程度,  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

### 3.2 综合评价

将单个指标分数与指标权重相乘加和, 便得到最终的评估结果, 计算公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^q Z_i \times \theta_i \quad (11)$$

式中,  $Z$  表示最终得分,  $\theta_i$  表示第  $i$  项指标的综合权重。

## 4 结论

本文基于数据、指标、应用的原则构建了基于大数据的发电机组无功运行考核评价总体架构, 自下而上分为三层: 数据层、指标层、应用层。在数据层应用大数据技术实现考核评价所需的各类数据源的统一建模、存储, 并为上层数据获取提供计算、管理等服务。通过对无功运行管理过程及无功设备分析, 构建了包括容量配置、控制能力、控制策略、设备状况 4 项一级评价指标的完整评价指标体系, 为发电机组无功运行考核评价提供了科学、合理的指标体系。最后, 研究提出了层次分析法与熵权值法相结合的综合评价方法, 该方法已经应用到电网调控领域, 评价方法得到了验证, 可以为电网无功管理运行提供科学有效的指导。

#### 参考文献:

[1] 万卫, 王淳, 程虹, 等. 电网评价指标体系的初步框架[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 14-18.  
WAN Wei, WANG Chun, CHENG Hong, et al. Preliminary frame of index system for evaluating power network [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 14-18.

[2] 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.

[3] 王德文, 孙志伟. 电力用户侧大数据分析 with 并行负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(03): 527-537.  
WANG Dewen, SUN Zhiwei. Big data analysis and parallel load forecasting of electric power user side [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(03): 527-537.

[4] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(01): 2-12.  
ZHANG Dongxia, MIAO Xin, LIU Liping, et al. Research on development strategy for smart grid big data [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(01): 2-12.

[5] 卫泽晨, 赵凤展, 王佳慧, 等. 网格化中低压智能配电网评价指标体系与方法[J]. 电网技术, 2016, 40(01): 249-255.  
WEI Zechen, ZHAO Fengzhan, WANG Jiahui, et al. Gridding evaluation index system and method of MV and LV intelligent distribution network [J]. Power System Technology, 2016, 40(01): 249-255.

[6] 文明, 何禹清, 蒋海波, 等. 计及无功经济价值的配电网电容器优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(09): 59-64.  
WEN Ming, HE Yuqing, JIANG Haibo, et al. Optimal planning of capacitor in distribution systems considering the reactive power value [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(09): 59-64.

[7] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.  
NIE Hongzhan, LV Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method [J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.

[8] 欧阳蓉. 考虑经济性和电压稳定性的含电子电力变压器的多目标最优潮流计算[J]. 电力大数据, 2018, 21(12): 69-75.  
OUYANG Rong. Multi-objective optimal power flow calculation considering economy and voltage stability factors for power grids incorporating electronic power transformer [J]. Power Systems and Big Data, 2018, 21(12): 69-75.

[9] 邱晓燕, 张子健, 李兴源. 基于改进遗传内点算法的电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 27-31.  
QIU Xiaoyan, ZHANG Zijian, LI Xingyuan. Multi-objective reactive power optimization based on improved genetic-interior point algorithm [J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 27-31.

[10] 刘科研, 盛万兴, 李运华. 基于改进免疫遗传算法的无功优化[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 11-16.  
LIU Keyan, SHENG Wanxing, LI Yunhua. Reactive power optimization based on improved immunity genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 11-16.

[11] 姜振超, 杨洪耕. 基于数学形态学和遗传算法的配电网动态无功优化方法[J]. 电网技术, 2007, 31(23): 68-73.

JIANG Zhenchao, YANG Honggeng. A mathematical morphology and genetic algorithm based dynamic reactive power optimization method for distribution network [J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 68-73.

[12] 马世英, 印永华, 李柏青, 等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 8-13.

MA Shiyong, YIN Yonghua, LI Baiqing, et al. A research on voltage stability evaluation criteria for interconnected power grid in China [J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 8-13.

[13] 李欣然, 刘杨华, 朱湘有, 等. 高压配电网建设规模的评估指标体系及其应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 18-24.

LI Xinran, LIU Yanghua, ZHU Xiangyou, et al. Indices system and its application for evaluating planning scale of HV distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 18-24.

[14] 王佳贤, 程浩忠, 胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规

划方法[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 56-61.

WANG Jiaxian, CHENG Haozhong, Hu Zechun. Optimal reactive power planning for distribution systems considering multi-load levels [J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 56-61.

[15] 刘传铨, 张焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 79-81.

LIU Chuanquan, ZHANG Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity [J]. Power System Technology, 2007, 31(12): 79-81.

收稿日期: 2019-01-22

作者简介:



邢晶(1988),男,硕士,工程师,主要从事电网调度和运行方式管理等工作。

(本文责任编辑: 范斌)

## Research on evaluation method of reactive power operation assessment of generator set based on big data

XING Jing<sup>1</sup>, WU Jiang<sup>2</sup>, LIU Haitao<sup>1</sup>, ZHOU Bo<sup>1</sup>, SUN Weimin<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, BAI Jingjie<sup>2</sup>, MA Fu<sup>2</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Xicheng 100054 Beijing, China;

2. Beijing Kedong Electric Power Control System Co, Ltd., Haidian 100192 Beijing, china)

**Abstract:** In the process of power transmission, there are cases where power lines such as transmission lines, transformers, and bus bars are depleted to reduce power supply efficiency. Currently, reactive power compensation is commonly used to solve this problem. Therefore, the performance of the reactive power compensation device plays an important role in the safe and stable operation of the power system. However, there is currently no efficient means for reactive operation management, there is urgent need for a completely scientific approach to guidance. In view of the above problems and needs, this paper firstly applies the big data technology to build the data layer that supports the calculation and analysis of the evaluation indicators. According to the actual business demand analysis of the reactive operation evaluation of the generator set, a complete evaluation index system is proposed, including three secondary indicators, which are equipment availability, equipment depreciation rate and Equipment failure rate. Finally, the analytic hierarchy process is proposed. A comprehensive evaluation method combined with the entropy weight method. Applying the indicators proposed in this paper to evaluate the reactive operation of the grid-connected generator set, it can reflect the actual operation of the unit from an objective angle, and provide auxiliary decision-making for the professional management personnel of the grid operation.

**Key words:** reactive power compensation; big data technology; evaluation index; evaluation method