

Study on Energy Efficiency Evaluation Model of 110 kV Universal Design Substation

Wenxiao Qian¹, Jingyuan Liu¹, Haibo Liu², Xiujiang Zuo¹, Zhankai Fang³, Fan Yang³

¹Electric Power Research Institute, State Grid Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Huhhot Inner Mongolia

²State Grid Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd., Huhhot Inner Mongolia

³State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing

Email: 1597132881@qq.com

Received: Dec. 4th, 2016; accepted: Dec. 25th, 2016; published: Dec. 28th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The rapid development of economy is inseparable from the power, and the energy consumption brought by the operation of a large number of substations attracts more and more attention. It is of great significance to evaluate the energy efficiency of substation operation and management so as to improve the energy efficiency of substations. Based on the investigation and measurement of 110 kV universal design substation in the east of Inner Mongolia, this paper studies the operation and management methods of substation and the energy consumption characteristics of the power equipment, collects the data which reflects energy consumption of the substation and puts forward the energy efficiency evaluation index system. Finally, the energy efficiency of 110 kV universal design substation is evaluated synthetically by fuzzy judgment method, and then a complete energy efficiency evaluation system is obtained by combining the national industry standard and the weight of each factor based on AHP in the energy efficiency of the substation. The feasibility of the model is proved by the actual measured energy efficiency data of the substation, which provides the guidance for the energy efficiency optimization of the 110 kV universal design substation.

Keywords

General Design Substation, Analytic Hierarchy Process, Energy Efficiency Evaluation, Operation Management

110 kV通用设计变电站能效评估模型研究

钱文晓¹, 刘景远¹, 刘海波², 左秀江¹, 房占凯³, 杨帆³

¹国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特

²国网内蒙古东部电力有限公司, 内蒙古 呼和浩特

³重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

Email: 1597132881@qq.com

收稿日期: 2016年12月4日; 录用日期: 2016年12月25日; 发布日期: 2016年12月28日

摘要

经济的飞速发展离不开电力, 而大量变电站的投运所带来的能源消耗问题越来越受到重视, 评估变电站的运行管理的能效, 从而提高变电站能效水平, 对于实现绿色环保变电站的建设意义重大。本文通过对内蒙古东部地区现有的110 kV通用设计变电站的实地调查和测量统计, 研究变电站的运行管理方法和电力设备的用能特点, 采集反应变电站能耗的相关数据, 提出能效评估的指标体系, 结合国家行业标准, 确定基于层次分析法的各因子在变电站能效中的权重, 最后利用模糊评判法对110 kV通用设计变电站能效进行综合评定, 从而得到完整的能效评估体系。利用实际测量的变电站能效数据对模型进行验证, 证明了其可行性, 为110 kV通用设计变电站的能效优化提供了指导。

关键词

通用设计变电站, 层次分析法, 能效评估, 运行管理

1. 引言

随着我国经济的发展, 电力作为能源必不可少, 变电站作为电力传输的纽带, 发挥着不可忽视的作用。近年来我国有越来越多的变电站投运, 而变电站的能源消耗的评估与节能问题愈来愈显的重要。

目前在变电站节能设计或评估方面, 国外学者首先注意的是变电站部件的发明创新或技术性改造, Nagel W. D.通过研究非晶态铁芯变压器技术[1]的发展, 对比其与传统的高效率硅钢变压器, 发现非晶态铁芯变压器在效率和电能损失方面优于传统变压器。Y. Hsu 运用启发式算法[2]对变电站馈线和分段开关进行了规划, 达到节能降耗的目的。Van Bajsic 提出了一种无需辅助能源供应热水变电站[3]的数值模拟的数学模型, 目的在于减少能源消耗, 优化热水器、热水服务。刘海忠[4]通过对合理选择光源、灯具、照明标准值以及照明控制方式等方面的探讨, 结合变电站工程实际情况浅述了相应的措施以期更好地实施变电站的绿色照明。华北电力大学的李少勤对变电站建设项目的节能评估体系进行了研究, 提出了变电站节能建设评估指标。

然而虽然国内外对节能技术研究日益加深, 但很多指标不能量化, 仍然缺乏完整有效的变电站能效评估体系, 即难以对变电站电力设备及其运行管理方法给予较为全面准确的能效评估。

本文拟对110 kV通用设计变电站的主要能耗的电力设备和其运行管理方法进行深入分析, 研究其耗能特点并且实地调查和采集相关数据, 运用层次分析法[5]建立变电站能效评估模型, 并且对110 kV通用设计变电站的能效优化做出一定的指导。

2. 变电站能效管理现状及特点

110 kV 变电站作为联系电力产业链的核心环节, 担任着电力传输的重要的角色, 是实现节能减排的效益的重要载体。变电站在节能减排中发挥着不可忽视的作用, 目前我国变电站能效管理中所存在的主要问题有以下几个方面。

2.1. 设备发热量大

变电站内有大量的电力设备, 主变压器、电抗器和电容器等的损耗。其中变压器损耗是变电站电耗的最主要组成部分, 它主要包括变压器铁芯中的铁损(固定损耗)和变压器绕组电阻上的铜耗(可变损耗)。电抗器主要作用是吸收无功功率限制电压升高, 提高输电能力。电抗器因能抵抗电流的变化, 也被用来限制电力系统的短路电流。电抗器损耗是固定损耗, 与运行电压有关。电容器的主要作用是提供无功功率, 提高电力系统运行的稳定性, 达到节约电能的目的, 电容器的损耗和其容量及运行时间都有关系。

2.2. 站用电量

站用电是指变电站内为保证设备正常工作和电网安全可靠的用电负荷, 主要是辅助生产设施及附属生产设施耗电, 分为照明系统、暖通系统、生产系统、给排水系统、生活办公用电等, 包括有主变冷却器、风机、空调、照明灯、水泵等设备。站用电水平不仅与变电站电压等级、规模及自动化程度有关, 也与其节能管理制度和运行管理方法有关。

2.3. 站用水量问题

变电站用水主要为生活用水、消防用水及不可预见用水。生活用水为站内值守人员用水, 变电站值守人员数量由变电站规模、项目所在地经济水平等因素决定, 很多变电站给水系统以及用水设备问题, 造成水资源浪费。

2.4. 节能管理问题

据调查, 许多变电站的站用电量统计[6]都是在站用电出口处安装功率表, 并通过自动化装置将表的读数传到控制室内, 工作人员每月将数据读取一次, 我国在这方面的管理存在着一些问题, 主要是:

- 站用电量表计的安装点较少。目前, 大部分变电站的站用电量表计只是安装在站用电进线所接变压器的低压侧, 对站用电量的计量只是停留在总用电量的层面, 没有细化到可以去分析主要的耗电量的位置, 并及时做出节能优化。
- 在节能减排工作上, 大部分只是停留在口头宣传上, 缺少进行系统的节能基础数据的统计、形成节能评价指标体系和进行严格有效的节能绩效考核; 应把节能管理看成一个系统的科学体系, 要将节能管理规范化、制度化, 有效的节能管理需要做到有步骤、有可执行性的以节水、节油、节电为重点的工作。
- 虽然各个变电站都进行了一定的节能技术改进, 比如进行节能灯更换等, 但对于各个变电站都还有很大的节能潜力, 应对变电站的运行规律和设备情况进行调研分析, 进行节能分析和可行有效的节能技术改造。
- 缺少对变电站站用电结构的系统认识。以往站用电量的考核及指标的下达, 只是根据之前的历史数据确定下一年的指标, 即使提出要降低站用电量也是在以前站用电量的基础下降一定的比例, 由于缺少对变电站站用电结构的系统的认识, 以前下达站用电量的指标是否合理也没有一个科学合理的评价标准。

3. 指标体系的建立

3.1. 指标体系构建原则

变电站能效指标体系是由一系列能全面反映被评价对象本质属性或特征的指标构成，是对研究对象进行评价的前提和基础。指标体系的合理性和全面性直接影响评价结果的准确性。

能效指标体系应能真实、全面地反映配电网的能效水平；指标体系的构建应考虑不同地区配电网结构客观存在的差异，确保评价结果的合理性和可比性#多角度综合考虑，深入分析已有相关标准规范，确保指标体系的完整和均衡指标体系还应具备开放性和先进性，以适应被评价对象的发展趋势。

本文建立的指标体系涵盖了变电站主变压器损耗、电抗器损耗、电容器损耗以及站用电量大小，保证了指标的全面性；除此之外，对于这些变电站的客观条件之外，还加入了主观条件，就是节能管理方法，更加提升了指标的合理性。

3.2. 指标体系构建

依据 AHP 原理分层建立变电站能效评估指标体系，指标层从上到下分别为 $O = \{\text{变电站能效水平}\}$ ， $A = \{\text{电力设备能效, 站用电能效, 站用水能效, 管理节能指标}\}$ ，接下来就是包含各单项指标的 B 层，按照指标对总体能效水平方向的影响，可将指标分为正向指标和逆向指标。指标值越大，能效水平越高，即为正向指标，如空调能效水平；指标值越大，能效水平越低，即为逆向指标，如变压器损耗等。

参考资料文献[7]及国家相关标准和设计规范[8]，综合以上原则建立的变电站能效指标体系见图 1。

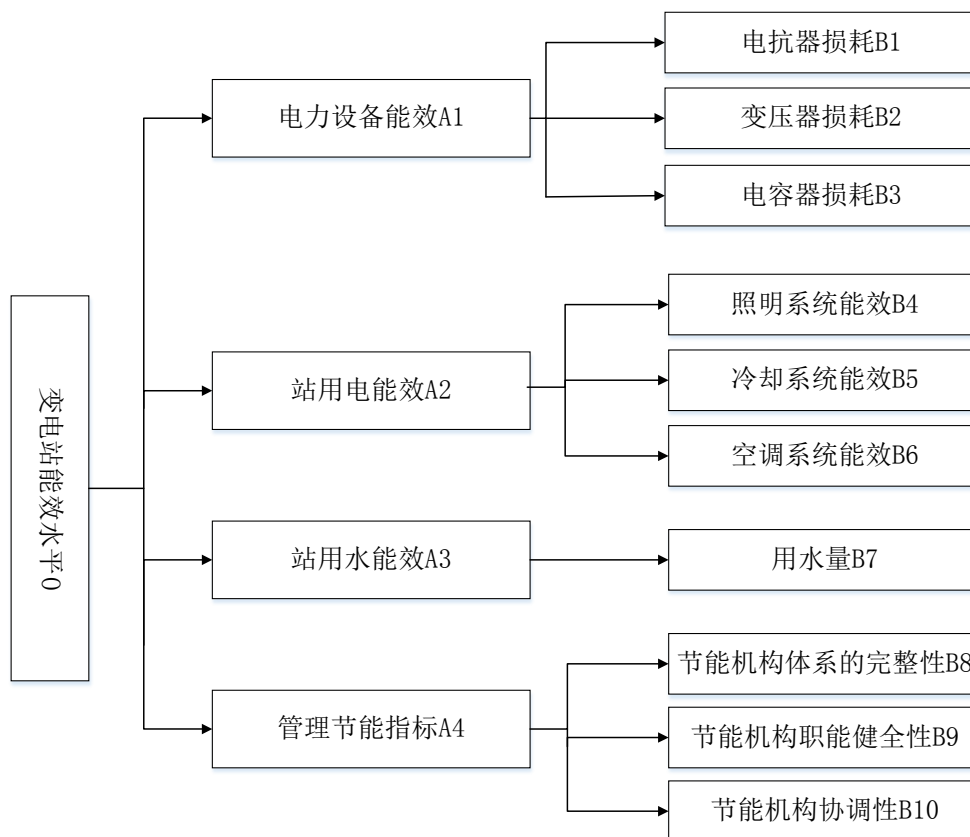


Figure 1. Evaluation index system for energy efficiency of substation
图 1. 变电站能效评估指标体系

4. 评估模型的建立

4.1. 层次分析法 AHP 的原理及特点

AHP [9] [10] [11]就是把所要研究的复杂问题看作一个大系统,通过对系统的多个因素的分析,划出各因素间相互联系的有序层次;再请专家对每一层次各因素进行较为客观的判断后,相应给出相对重要性的定量表示;进而建立数学模型,计算出每一层次全部因素的相对重要性的权值,并加以排序;最后根据排序结果进行规划决策和选择解决问题的措施。

特点:充分利用人们的经验和决策,采用相对标度对定量与不可定量进行统一测度,实现定性和定量的统一,直观反映决策结果。

4.2. 一般的 AHP 建模

- 建立递阶层次的结构模型

首先要把问题层次化,构造出一个有层次的结构模型,如图 2。

最高层:分析问题的预定目标,目标指数。

中间层:准则层,包含了为实现目标所涉及的中间环节,它可以有若干个层次组成,包括所需要考虑的准则、子规则。

最底层:措施层和方案层,这一层次包括了为实现目标可供选择的各种措施、决策方案。

- 构造判断矩阵

由于某因子在该因素中所占的比重不易量化造成权重不好确定,从而采用判断,各因素两两之间相互比较,引用数字 1~9 及其倒数作为标度,如表 1。

- 层次单排序及一致性检验

判断矩阵 A 对应于最大特征值 λ_{\max} 的特征向量 W ,经归一化后即为一层次相应

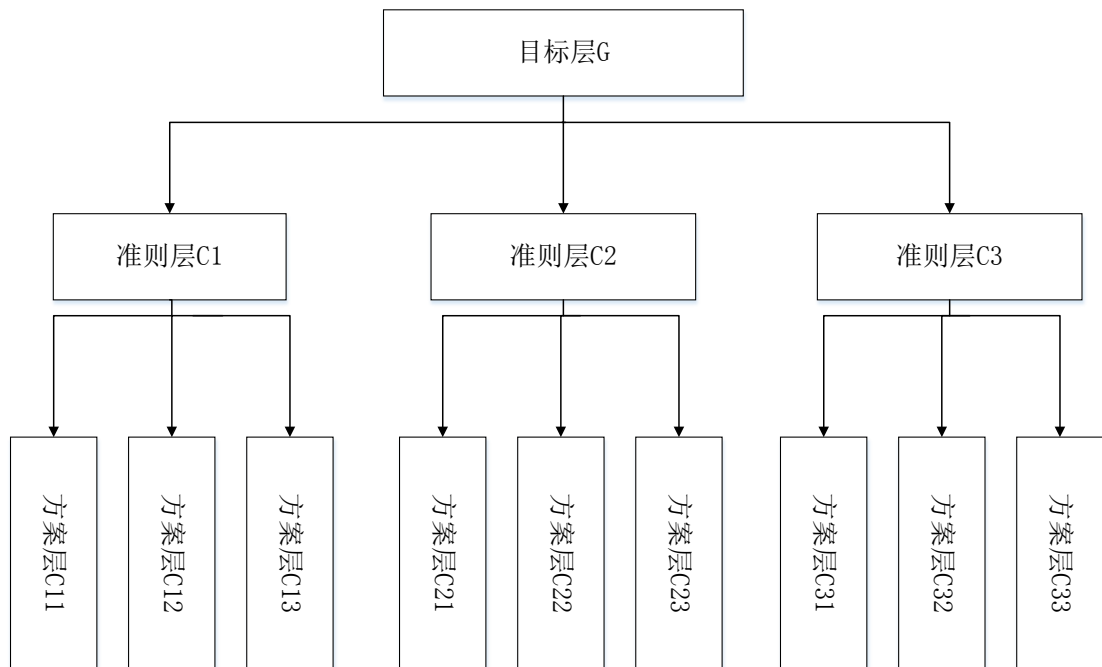


Figure 2. The block diagram of AHP structure

图 2. 层次分析法结构框图

Table 1. Assignment standard of elements in the judgment matrix
表 1. 判断矩阵中元素的赋值标准

a_{ij}	定义	a_{ij}	定义
1	A_i 和 A_j 同等重要	2	介于同等与略微重要之间
3	A_i 较 A_j 略微重要	4	介于略微与明显重要之间
5	A_i 较 A_j 明显重要	6	介于明显与十分明显重要之间
7	A_i 较 A_j 十分明显重要	8	介于十分明显与绝对重要之间
9	A_i 较 A_j 绝对重要		

因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值，这一过程称为层次单排序。如果比较结果是前后完全一致的，则矩阵 A 的元素还应当满足：

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

n 阶正互反矩阵 A 为一致矩阵，当且仅当其最大特征根 $\lambda_{\max} = n$ ；当 A 在一致性上存在误差时必有 $\lambda_{\max} > n$ ，并且，误差越大， $(\lambda_{\max} - n)$ 的值越大。判断步骤：

1) 计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

查找相应的平均随机一致性指标 RI，如表 2。

RI 的值是这样得到的，用随机方法构造 500 个样本矩阵：随机地从 1~9 及其倒数中抽取数字构造正互反矩阵，求得最大特征根的平均值 λ'_{\max} ，并定义

$$CI = \frac{\lambda'_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

2) 计算一致性比例 CR

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

当 $CR < 0.10$ 时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的，否则应对判断矩阵作适当修正。

3) 层次总排序及一致性检验

最终要得到各元素尤其是最低层中各方案对于目标的排序权重，从而进行方案选择。总排序权重要自上而下地将单准则下的权重进行合成。

4.3. 指标状态值

指标原始值与对应基准值的比，即为指标状态值[12]。若指标为正向指标，指标状态值为：

$$S_{\text{pos-}i} = \frac{S_{\text{orig-}i}}{S_{\text{base-}i}} \times 100 \quad (5)$$

式中： $S_{\text{orig-}i}$ 为第 i 项评价指标原始值； $S_{\text{base-}i}$ 为第 i 项评价指标基准值

若指标为逆向指标，指标状态值为：

$$S_{\text{pos-}i} = \frac{S_{\text{base-}i}}{S_{\text{orig-}i}} \times 100 \quad (6)$$

Table 2. The different value of RI with different n
表 2. 矩阵阶数 n 不同时对应的 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52

4.4. 综合权重

关于综合评价模型,对于变电站评估的多指标评价问题,有很多评价的模糊算子可用于将多个指标值“合成”为一个整体性的综合评价值,常见的有主要素确定、主要素突出、不均衡平均和加权平均等。针对本文研究,在变电站中存在着多项能效评估指标,并且有些指标间的联系不大,比如设备损耗与变电站运行管理方法,所以综合评价的模糊算子必须要兼顾各元素权重的大小,这样才能体现变电站能效评估的整体特征,而这些模糊评价算子中,只有加权平均型是比较合乎要求的,故本文选择加权平均型进行整体指标的优化综合。

令由 AHP 计算得到最底层各指标对于总目标的层次总排序权重为 $W = [\mathcal{W}_1, \mathcal{W}_2, \mathcal{W}_3, \dots, \mathcal{W}_n]$, 各指标状态值为 $S = [s_1, s_2, s_3, \dots, s_n]^T$, 则最后的综合权重为:

$$V = WS = \sum_{i=1}^n \mathcal{W}_i s_i \quad (7)$$

5. 实例分析

5.1. 各项指标的实际分析

- 对于 B1 电抗器能耗,电抗器能耗理论计算方法参照《电力系统设计手册》,计算公式如下: $\Delta A = \Delta P_o T$
 式中: ΔP_o ——电抗器额定电压下的功率损耗(kW), T ——电抗器运行时间(h)
- 对于 B2 变压器能耗理论计算方法参照《电力系统设计手册》[1], 计算公式如下:

$$\Delta A = \Delta P_o T + \Delta P_c (S/Se) 2\tau \quad (8)$$

式中: ΔP_o ——变压器空载损耗(kW), T ——变压器运行时间(h)

ΔP_c ——变压器负载损耗(kW), S ——变压器运行容量(MVA)

Se ——变压器额定容量(MVA), τ ——最大负荷损耗小时数(h)

- 对于 B3 电容器损耗,电容器能耗理论计算方法参照《电力系统设计手册》, 计算公式如下:

$$\Delta A = 0.003 Q_c T \quad (9)$$

式中: Q_c ——电容器容量(kW), T ——电容器运行时间(h)

- 对于 B4 照明系统能效

$$\text{照明系统能效} = \text{节能灯具占比} + \text{照明节能控制覆盖率} \quad (10)$$

节能灯具占比指变电站节能灯具功率与变电站照明总功率的比率,单位为%。节能灯具为国家认可的光效高的、节能型光源,如用紧凑型、细管径荧光灯等,LED灯,螺旋管或U形管节能灯等。照明节能控制覆盖率是指照明节能控制覆盖面积与变电站总面积的比率,单位为%。照明节能控制覆盖面积是指采用了时控、声控、红外线控制等照明控制手段的灯具的照明面积。照明系统指标为正向型指标,指标值越大代表变电站照明系统节能效果越好。

- 对于 B5 冷却系统能效

旨在评价变电站冷却系统耗能大小以及单位变电站容量下冷却系统的能耗水平,所以在本节能指标体系中定义冷却系统能效指标的计算方法如下,单位为 kW/MW。

$$\text{冷却系统能效} = \frac{1}{S_{\text{站}}} \sum_{i=1}^n P_i \quad (11)$$

其中 n 为冷却系统用电设备的数量; P_i 为第 i 台冷却系统用电设备的额定功率; $S_{\text{站}}$ 为变电站的容量大小。

- 对于 B6 空调系统能效

在站用电节能指标体系中空调系统能效指标旨在评价变电站空调系统耗能水平, 从空调机组的能效等级等方面进行评价, 所以在本节能指标体系中定义照明空调系统指标的计算方法如下:

$$\text{空调系统能效} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad (12)$$

其中 n 为变电站空调数量; N_i 为第 i 台空调机组的能效等级, 可为 1, 2, 3, 4, 5。

- 对于 B7 站用水量

一般的 110 kV 变电站都是无人值守的, 但是在实地调查中发现, 为保证电网安全, 有些变电站是有人在看守的, 有一定的生活用水, 其用水量和值守人员的数量成正比。消防用水量的计算主要是主控楼和主变消防用水。根据 GB50229-2006《火力发电厂与变电站设计防火规范》, 主控楼体积不超过 3000 m³, 可不设消防用水。主变消防可设置泡沫喷雾或水喷雾, 如果设置水喷雾, 流量为 80 L/s~120 L/s, 灭火时间 0.4 h, 室外消防栓 10 L/s, 灭火时间 2 h。不可预见用水量较小, 一般需依据工程规模估算。

- 对于 B8、B9、B10, 调研发现, 很多变电站并没有成文的规定, 稍微先进的变电站有节能经验的积累, 但是对于节能管理制度的建立与发展, 还基本上是一片空白。

5.2. 综合权重的确定

准则层元素对于目标层元素的重要程度两两进行对比, 构建 A 对 B_j 的判断矩阵, 见表 3。

用 yaahp 软件计算指标权重分析如下:

用 yaahp 软件计算一级指标的权重, 得出结果为: $A_1 = (0.2062, 0.5245, 0.2693)$, 最大特征值为 $\lambda = 3.0044$, 一致性检验为 0.0043, 小于 0.1, 符合要求, 三个指标对总目标的权重为 1.000。

同理对 A₂ 进行判断矩阵的列写并利用 yaahp 软件计算指标权重, 最终得出一级指标权重为

$$A = (0.5245, 0.2062, 0.1213, 0.1480)$$

6. 总结

通过对以上的实验数据分析及变电站用能特点的研究发现, 变电站设备的能源损耗在能效评估中占着较大的比重, 用水及运行管理方法所占比重较小; 而在实际中变电站的运行中, 变电站的设备损耗确实是其主要原因, 在用水方面, 现在很多变电站建设越来越规范, 甚至无人值守, 水量损耗因素确实比较小, 对于变电站的运行管理, 由于在一年中, 用电调度范围较小, 其节能管理考虑甚微; 综合看来,

Table 3. The judgment matrix of B_j to A₁

表 3. B_j 对 A₁ 的判断矩阵

A ₁	B ₁	B ₂	B ₃
B ₁	1	1/6	1/2
B ₂	6	1	4
B ₃	2	1/4	1

本文所建立的变电站能效评估模型在一定程度上和实际情况相验证, 对于直观反应变电站能效水平提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] 电力工业部电力规划设计总院. 电力系统设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 陈兵, 齐立勇. 减少低压电网电能损耗的探讨[J]. 中国计量, 2012(6): 38-39.
- [3] 陈家庚, 林其友. 优化完善电网结构在节能减排领域中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 118-126.
- [4] 胡思平, 向海清. 浅谈电能计量在节能降耗中的应用[J]. 中国电力教育 2009 年管理理论与实践专刊, 2009(S1): 226-227.
- [5] 翁嘉明, 刘东, 何维国. 基于层次分析法的配电网运行方式多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 56-61.
- [6] Mili, L. and Dooley, K. (2010) Risk-Based Power System Planning Integrating Social and Economic Direct and Indirect Costs. In: *Economic Market Design and Planning for Electric Power Systems*, Wiley-IEEE Press, Inc., 161-179.
- [7] GB50059-2011 35~110kV 变电所设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [8] GB/T 13462-2008 电力变压器经济运行[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] Ghotbiravandi, M.R., Monazam, M.R., Haghdst, A.A., et al. (2011) Assessment of the Risk of Occupational Exposure to Electromagnetic Fields in Power Substations, Kerman, Iran. *Journal of Military Medicine*, **13**, 18-34.
- [10] Liu, H., Zabinsky, Z.B. and Kohn, W. (2010) Rule-Based Control System Design for Smart Grids. 2010 *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, Minnesota, USA, 25-29 July 2010, 1-5.
- [11] Su, Z.-Y. (2003) To Intensify Basic External Insulation Level of Power System-Fundamental Way for Prevention of Large-Scale Pollution Flashover. *Electric Power*, **36**, 57-61.
- [12] 马丽丽, 田淑芳, 王娜. 基于层次分析与模糊数学综合评判法的矿区生态环境评价[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(3): 165-170.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org