

基于层次分析法的微电网并网运行 电能质量安全监测模型

孙赞^{1†}, 王迪², 鲁云云¹, 张彩婷¹

(1. 中国石油天然气股份有限公司 长庆工程设计有限公司, 陕西 西安 710018;

2. 中国石油天然气股份有限公司 第六采油厂, 陕西 西安 710018)

摘 要: 为了满足日益增长的电力能源需求, 微电网并网运行是电力系统的主要发展趋势, 其虽然能够提升电力能源的供应, 但难以保证供电质量, 不利于电力系统的后续发展。该现象的产生主要是由于分布式电源出力具有随机性与不稳定性, 会对供电质量造成直接影响。对此, 提出基于层次分析法的微电网并网运行电能质量安全监测模型构建研究。深入分析电能质量干扰源, 以此为基础, 选取适当的电能质量安全监测指标, 应用层次分析法计算电能质量安全监测指标权重数值, 确定电能质量安全监测模型, 制定电能质量安全判定规则, 从而实现电能质量安全的准确监测。实验数据显示: 构建模型应用后, 电能质量安全监测指标完整度最大值为 96%, 电能质量安全监测结果与实际结果一致, 充分证实了构建模型具备更好的电能质量安全监测效果。

关键词: 并网运行; 微电网; 安全监测; 层次分析法; 电能质量; 监测指标

中图分类号: TM714

文献标识码: A

Power Quality Safety Monitoring Model for Microgrid Grid-connected Operation Based on Analytic Hierarchy Process

SUN Yun^{1†}, WANG Di², LU Yunyun¹, ZHANG Caiting¹

(1. PetroChina Changqing Engineering Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China;

2. PetroChina No. 6 Oil Production Plant, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

Abstract: In order to meet the increasing demand for power energy, micro-grid grid-connected operation is the main development trend of power system. Although it can improve the supply of power energy, due to the influence of the randomness of distributed generation output, the power quality will also decline, which is not conducive to the subsequent development of power system. A study on the construction of micro-grid grid-connected operation power quality safety monitoring model based on analytic hierarchy process is proposed. Deeply analyze the power quality interference sources, and on this basis, select appropriate power quality safety monitoring indicators, calculate the weight value of power quality safety monitoring indicators using the analytic hierarchy process, determine the power quality safety monitoring model, and formulate power quality safety judgment rules, so as to achieve accurate monitoring of power quality safety. The experimental data shows that after the application of the built model, the maximum integrity of the power quality safety monitoring index is 96%, and the power quality safety monitoring results are consistent with the actual results, which fully confirms that the built model has better power quality safety monitoring effect.

Key words: grid-connected operation; microgrid; safety monitoring; analytic hierarchy process; power quality; monitoring indicators

随着国民生产及生活对电力能源依赖性的逐渐加深,电能质量优劣直接关系着人们的方方面面。调研数据显示:2022 年电能质量问题为中国造成了 100 亿元的经济损失。另外,电力设备的升级与发展,使其对电能质量的要求也逐渐提高。若是电能质量较低,极有可能会导致电力设备运行出错,从而影响电力设备发挥功能。亚洲电能质量联盟分析结果表明:电能质量降低不但会带来经济方面的损失,还会影响工业设备的使用时限,致使计算机数据的丢失。

为此,各国研究学者开始重视提高微电网并网运行电能质量的研究。文献[1]通过改变 IIDG 在特定时间窗口内的故障响应特性,将其正序故障分量阻抗角控制为给定值,在微电网中构造出不依赖于 II DG 功率输出策略的正序故障分量特征。文献[2]基于自适应陷波器锁相环代替传统的同步旋转坐标系锁相环,实现在电网电压不平衡且畸变时仍能准确地提取基波正序相位。文献[3]在传统 k-means 聚类算法的基础上增加马尔可夫影响因子。针对每个典型运行场景建立基于长短期记忆(LSTM)神经网络的微电网并网等效模型,利用 LSTM 神经网络的时序逻辑特性和内部非线性映射特性描述微电网并网节点整体动态运行特性。文献[4]在 MATLAB 环境中设计、建模和仿真基于电池支持的 UPQC 电压控制电压源转换器。文献[5]结合 DEMD 和优化随机森林(RF)机器学习方法,分类电能质量事件。利用 IEEE13 总线测试网格,在 MATLAB/Simulink 中对所提出的技术进行仿真。这些研究都具有一定的局限性,通过优化调度可以解决分布式电源并网的一些问题,但依然会影响电能质量,给电力用户带来不好的体验。

从宏观角度出发,电能质量提高是一项复杂的系统工程,包含安全监测、质量评估与控制等多个环节^[6]。安全监测是电能质量提高系统中的核心环节,也是后续电能质量管理与控制的前提条件,故提出基于层次分析法的微电网并网运行电能质量安全监测模型构建研究。

1 微电网并网运行电能质量安全监测模型构建

基于层次分析法的微电网并网运行电能质量安全监测模型的流程如图 1 所示。

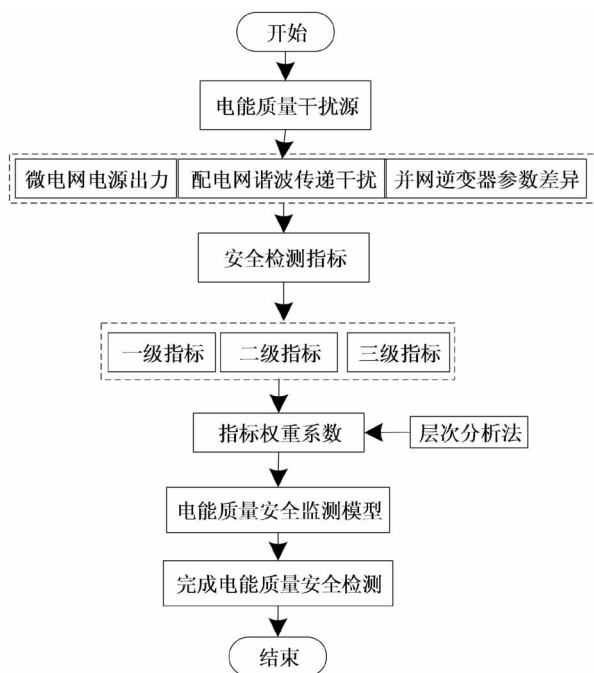


图 1 电能质量安全监测模型的流程

1.1 微电网并网运行电能质量干扰源分析

要想获得精准的微电网并网运行电能质量安全监测结果,首要任务就是深入分析电能质量的干扰源,为安全监测指标的选取提供充分的支撑依据。

根据已有文献研究成果,确定电能质量干扰源主要有三个,具体如下。

一是微电网电源出力不均。

微电网中分布式电源出力特性会受到外部环境因素的影响,例如风力、日照强度等^[7]。当分布式电源出力不足时,很容易导致配电网电压偏低,从而降低电能的质量。以风力发电为例,由于风能具有极强的不确定性与随机性,致使风机输出功率呈现波动现象,配电网的电压也会出现偏差状况,两者之间的关系如下式所示:

$$U = E - \frac{PR + Q\beta}{E} - \alpha \frac{P\beta - QR}{E} \quad (1)$$

式(1)中, U 表示配电网的电压数值; E 表示风机扇叶获得的能量数值; P 与 Q 分别表示风机的有功功率与无功功率; R 表示风机扇叶半径数值; β 表示风机扇叶数量; α 表示辅助运算参数,取值范围为 $[1, 10]$ 。

微电网(风机)并网运行后,配电网电压偏差情况如图 2 所示。如图 2 所示,在采样点 1 处获得风机并网电压偏差最小值 1.2%,在采样点 10 处获

得风机并网电压偏差最大值 4.8%。从整体出发,风机并网电压偏差呈现波动状态,很难对其进行精准的预测,即控制难度较大,致使电能质量下降,影响用户的用电满意度^[8]。

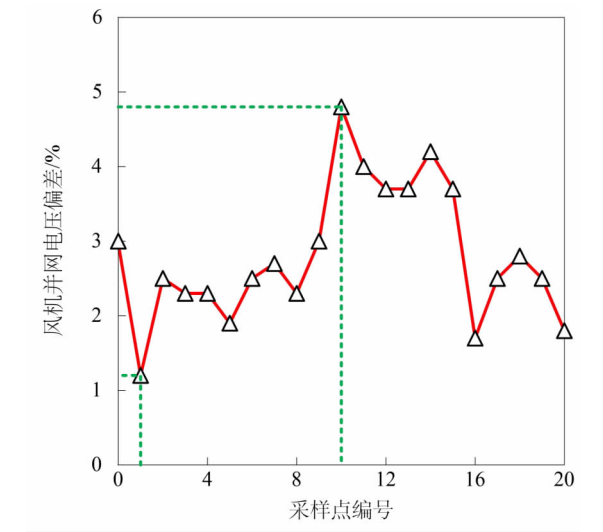


图2 风机并网电压偏差示例图

二是配电网谐波传递干扰。
微电网并网运行后,其邻近配电网内部存在着大型电力设备,例如整流器、电机等,上述电力设备会释放大量的谐波,谐波电压分量通过连接处逐渐渗透到电网母线中,引起电能质量的下降^[9]。谐波电压分量传递规律如图 3 所示。

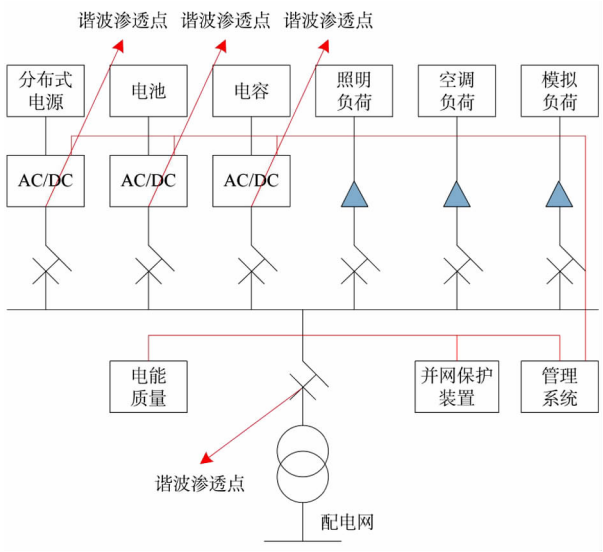


图3 谐波电压分量传递规律示意图

如图 3 所示,谐波渗透点主要为微电网并网连接处,其会对配电网电压产生较大的干扰,从而降低电能的输出质量。

三是并网逆变器参数差异。

微电网中包含多个分布式电源,由于发电技术、电源其他参数的不同,致使每个分布式电源输出功率特性差异性较强,配置逆变器参数之间存在的差别也较大。在该情况下,各设备输出电压的幅值与相位可能会产生较大差异,进而导致环流现象的产生,影响大电网输出电能的质量^[10]。

上述过程完成了微电网并网运行电能质量干扰源的深度剖析,为后续电能质量安全监测指标的选取奠定了坚实的基础。

1.2 电能质量安全监测指标选取

以上述微电网并网运行电能质量干扰源分析结果为基础,依据全面性、科学性等原则,选取适当的电能质量安全监测指标,为最终实现电能质量安全监测提供支撑^[11]。

根据研究需求与目标,选取电能质量安全监测指标,具体如表 1 所示。

表 1 电能质量安全监测指标表		
一级指标	二级指标	三级指标
技术性指标	频率质量	频率偏差
	电压质量	电压偏差
		电压波动与闪变
		谐波电压分量
		三相不平衡度
		电压暂降
		电压暂升
		电压中断
	供电可靠性	供电可靠率
	综合线损	综合线损率
服务性指标	需求侧管理	用户对电价的满意度
		用电过程中的节电效益
		用户对电能质量的满意度

如表 1 所示,三级指标数量最多,为 13 个;一级指标数量最少,为 2 个;二级指标数量为 5 个。其中,电压质量最能直接体现电能质量的好坏,故对其进行深入探究^[12]。电压偏差计算公式为:

$$\chi_i = \frac{U_i - U_0}{U_0} \times 100\%$$

(2)

式(2)中, χ_i 表示电压偏差数值; U_i 表示电网节点*i*的电压数值; U_0 表示标准电压数值。

常规情况下,当电压偏差 χ_i 在 $[-10\%,7\%]$ 范围内时,认定电能质量符合安全标准;当电压偏差 χ_i 在 $[-10\%,7\%]$ 范围外时,认定电能质量不符合安全标准,需要对电压进行及时的控制与调整。

电压波动值计算公式为:

$$\delta_i = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_0} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, δ_i 代表电压波动值;电压的最大值为 $U_{\max}$;电压的最小值为 $U_{\min}$ 。

电压波动会引起照明灯亮度变化、大型工业设备转速不均匀等,若是电压波动现象一直存在,则会影响人们的正常生产与生活^[13]。由于研究篇幅有限,不对其他电压质量三级指标进行赘述。

1.3 电能质量安全监测指标权重计算

以上述选取的电能质量安全监测指标为依据,通过分析可知,每个指标对于最终电能质量安全监测结果的影响程度是不同的,若是将其直接进行加和处理,获得的安全监测结果将与实际结果偏差较大,不利于控制与提高电能质量。因此,此节应用层次分析法对电能质量安全监测指标权重进行准确的计算,为最终模型的确定做好准备^[14]。

基于层次分析法的电能质量安全监测指标权重计算步骤如下。

步骤一:将电能质量安全监测指标划分为三层结构,分别为目标层——电能质量安全监测,准则层——二级指标(表 1),指标层——三级指标(表 1);

步骤二:依据步骤一确定的层次结构构造判断矩阵,表达式为:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2n} \\ \vdots & \vdots & f_{ij} & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中, $\mathbf{F}$ 表示判断矩阵; f_{ij} 表示第 i 个监测指标与第 j 个监测指标相比所得的标度值,其主要利用 1~9 标度法获取,具体规则如下式所示:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \text{监测指标 } y_i \text{ 与 } y_j \text{ 同等重要} \\ 3, \text{监测指标 } y_i \text{ 比 } y_j \text{ 稍微重要} \\ 5, \text{监测指标 } y_i \text{ 比 } y_j \text{ 明显重要} \\ 7, \text{监测指标 } y_i \text{ 比 } y_j \text{ 强烈重要} \\ 9, \text{监测指标 } y_i \text{ 比 } y_j \text{ 极端重要} \\ 2/4/6/8, \text{介于 } 1/3/5/7/9 \text{ 之间} \end{cases} \quad (5)$$

步骤三:为验证权重系数计算结果是否正确,需考虑 $\mathbf{F}$ 对结果的影响,对 $\mathbf{F}$ 开展一致性验证,其过程可由下式表示:

$$\zeta = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

式(6)中, $\mathbf{F}$ 一致性检验因子可由 ζ 代表; $\mathbf{F}$ 的

最大特征值为 $\lambda_{\max}$ 。

当公式(6)计算结果大于或等于 0.1 时,判定 $\mathbf{F}$ 与检验标准不匹配,需重新调整 $\mathbf{F}$ 的参数^[15];反之,当公式(6)计算结果小于 0.1 时,判定 $\mathbf{F}$ 与检验标准匹配。

步骤四:以符合一致性检验标准的判断矩阵 $\mathbf{F}$ 为基础,计算监测指标权重数值,表达式为:

$$\omega_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_{ij} \right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n f_{kj} \right)^{1/n}} \quad (7)$$

式(7)中,第 i 个监测指标的权重数值可由 ω_i 代表。

依据式(7)计算全部监测指标的权重数值,获得电能质量监测指标权重向量 $\mathbf{W} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \cdots \ \omega_n]^T$ 。

通过上述步骤即可完成监测指标权重的计算,为电能质量安全监测结果的获取提供依据支撑。

1.4 电能质量安全监测模型确定

以上述电能质量安全监测指标权重计算结果为依据,确定电能质量安全监测模型^[16],表达式为:

$$K = \sum_{i=1}^n \omega_i \times y_i \quad (8)$$

式(8)中, K 表示电能质量安全监测结果。

依据公式(8)计算结果,结合电能质量安全需求,制定电能质量安全判定规则,具体如下。

(1)当 K 处于 $[0, 0.2]$ 范围内时,认定电能质量安全等级为 I,电能质量安全性极差;

(2)当 K 处于 $(0.2, 0.4]$ 范围内时,认定电能质量安全等级为 II,电能质量安全性较差;

(3)当 K 处于 $(0.4, 0.6]$ 范围内时,认定电能质量安全等级为 III,电能质量安全性一般;

(4)当 K 处于 $(0.6, 0.8]$ 范围内时,认定电能质量安全等级为 IV,电能质量安全性良好;

(5)当 K 处于 $(0.8, 1]$ 范围内时,认定电能质量安全等级为 V,电能质量安全性优秀^[17]。

通过上述过程实现微电网并网运行电能质量安全的监测,为微电网后续应用与发展提供助力。

2 实验与结果分析

选取基于 LSTM 的重要用户电能质量趋势预测分析模型^[18]与基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估^[19]作为对比模型 1 与 2,设置电能

质量安全监测对比实验,以此来验证构建模型的应用效果。

2.1 实验对象选取

选取某城市配电网(含分布式电源)作为实验对象,其微电网并网运行结构如图 4 所示。

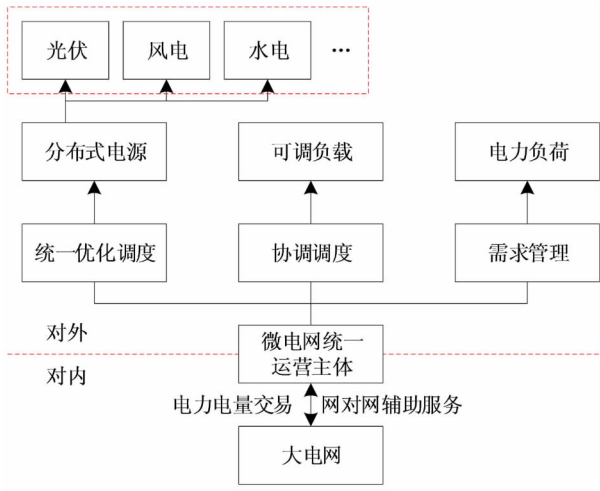


图 4 微电网并网运行结构示意图

如图 4 所示,微电网包含多种分布式电源,例如光伏阵列、风机等,其与大电网连接并行,符合构建模型应用性能测试需求。

2.2 电能质量安全监测指标权重确定

为了方便后续实验的顺利进行,根据各项指标的相对差异性和重要性,采用 1.3 节计算方法,根据专家的打分构造判断矩阵 F ,提前对监测指标权重进行计算与确定,保证评价结果可信度和准确性,得出各项指标的权重向量。具体如表 2 所示。

表 2 电能质量安全监测指标权重数值表

二级指标	权重	三级指标	权重
频率质量	0.18	频率偏差	0.18
电压质量	0.40	电压偏差	0.06
		电压波动与闪变	0.04
		谐波电压分量	0.05
		三相不平衡度	0.07
		电压暂降	0.08
		电压暂升	0.08
		电压中断	0.06
供电可靠性	0.15	供电可靠率	0.15
综合线损	0.16	综合线损率	0.16
需求侧管理	0.11	用户对电价的满意度	0.03
		用电过程中的节能效益	0.05
		用户对电能质量的满意度	0.03

如表 2 所示,利用层次分析法可得到电能质量安全监测指标权重系数,基于此对 F 一致性进行检验。若检验结果与一致性检验标准相匹配,则表明监测指标权重数值准确,为后续实验的进行提供便利。

2.3 实验结果分析

以上述选取的实验对象、确定的监测指标权重数据为基础,进行电能质量安全监测对比实验。构建模型与对比模型选取的监测指标并不一致,并会根据实验背景的不同而变化,获得的电能质量安全监测结果也不相同。为了更加直观地显示构建模型的应用性能,选取监测指标完整度及其监测结果作为评价指标,具体实验结果分析过程如下。

通过实验获得电能质量安全监测指标完整度如图 5 所示。

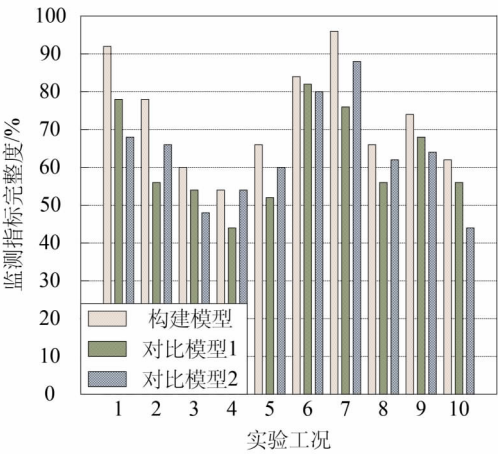


图 5 电能质量安全监测指标完整度示意图

如图 5 所示,构建模型应用后,在第 4 种实验工况背景下,获得电能质量安全监测指标完整度最小值 54%;在第 7 种实验工况背景下,获得电能质量安全监测指标完整度最大值 96%。通过比较研究发现,在不同实验工况背景下,构建模型监测指标完整度均高于其他两个对比模型,表明构建模型选取的监测指标更加全面、完整。

通过实验获得电能质量安全监测结果如图 6 所示。

如图 6 所示,构建模型应用后,获得的电能质量安全监测结果与实际结果保持一致,而对比模型 1 与 2 获得的电能质量安全监测结果与实际结果偏差较大,表明构建模型电能质量安全监测精度更高。

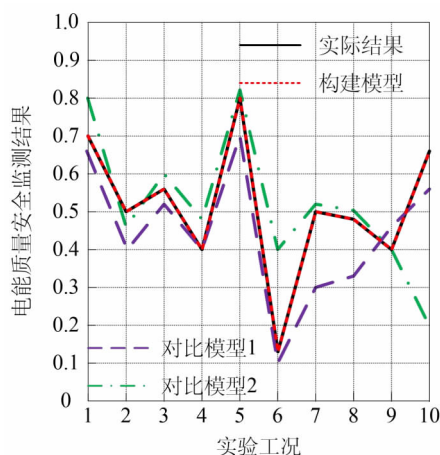


图 6 电能质量安全监测结果示意图

3 结 论

化石能源危机情况愈加严重,清洁能源发电技术受到了国家的广泛关注,电力系统的发展趋向于微电网并网运行。但由于太阳能、风能等可再生能源的性能不稳,电能质量无法保障,从而影响用户的满意度,制约电力行业的稳定运行,故提出基于层次分析法的微电网并网运行电能质量安全监测模型构建研究。实验数据显示:构建模型应用后,监测指标完整度得到了大幅度的提高,监测结果与实际结果相同,能够为电能质量的改善与提高提供更有效的模型支撑。但是所研究方法并未确定不同时序下接入配电系统的微电网安全运行范围,在后续研究中,为了保证全面的监测电能质量安全,还需要进一步完善模型,为相关领域提供一定的帮助。

参考文献

[1] 朱吉然,牟龙华,郭文明. 考虑并网运行微电网故障方向识别的逆变型分布式电源故障控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3):634—644.

[2] 袁性忠,王辉,贾宏刚,等. 基于储能型 APF 的微电网电能质量综合治理[J]. 高压电器, 2022, 58(8):238—244, 251.

[3] 蔡昌春,息梦蕊,刘昊林,等. 基于数据驱动和多场景技术的微电网并网等效建模[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9):64—69.

[4] TIWARI S, KEWAT S, SINGH B, et al. Battery—supported unified power quality controller for small hydro—based isolated power generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(10): 2160—2167.

[5] MISHRA S, MALLICK R K, GADANAYAK D A, et al. A novel hybrid downsampling and optimized random forest approach for islanding detection and non— islanding power quality events classification in distributed generation integrated system[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(8): 1662—1677.

[6] 宗海煥,孙帅,喻宙,等. 孤岛微电网下的单相 H 桥并网逆变器系统稳定性分析[J]. 电子器件, 2021, 44(3):564—568.

[7] 张程翔,汪科,陆莹,等. 微电网中储能运行模式自发切换的对策研究[J]. 电气传动, 2021, 51(23):70—75.

[8] 王子昂,孟润泉,韩青清. 微电网与配电网间串联补偿变压器直流偏磁抑制策略研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 127—133.

[9] 王晓毅,唐忠. 考虑供需自平衡和独立运行能力的并网型微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5):74—82.

[10] 毕永健,徐丙垠,赵艳雷,等. 同步定频微电网的并网/孤岛无缝切换控制策略[J]. 电网技术, 2022, 46(3):923—933.

[11] 赵安新,张育刚,韩安,等. 基于层次分析法的煤矿分级分层安全状态评估方法[J]. 煤炭技术, 2021, 40(3):162—165.

[12] 陈洁琦,林铭炜. 基于层次分析法的犹豫模糊语言包络分析模型及其在边缘节点网络安全评估中的应用[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(1):209—214.

[13] 杨天翼,赵强,王奎峰,等. 基于层次分析法和熵权法综合评价山东省水生态安全[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(6):566—571+579.

[14] 张晋芳,余隆丽,周郅灵,等. 基于层次分析法的超高层建筑结构选型[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1):358—362.

[15] 许中平,赵峰,李守超,等. 基于电能质量的变压器振动机理模型及振动信号相关性分析[J]. 变压器, 2021, 58(10):19—24.

[16] 肖先勇,胡誉蓉,王杨,等. 基于非同步电能质量监测系统的谐波状态估计[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12):4121—4131.

[17] 郭嘉琦,蒋建东. 可变模糊云模型电能质量综合评估[J]. 郑州大学学报:理学版, 2021, 53(3):110—118.

[18] 赵长伟,骈睿珺,杜天硕,等. 基于 LSTM 的重要用户电能质量趋势预测分析模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(7):26—33.

[19] 林才华,张逸,邵振国,等. 基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估[J]. 高电压技术, 2021, 47(5):1751—1761.