

区域柔性负荷参与功率调度的评价体系构建及其应用研究

马红伟, 甄立敬, 毛建容, 张萌

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 柔性负荷接入区域电网参与功率调度在改善电力系统调节能力方面存在着巨大潜力, 但也会给调度运行带来复杂的控制问题。为解决这一问题, 迫切需要建立一套客观公正和精确有效的区域柔性负荷综合评价体系来指导柔性负荷参与功率调度。首先, 针对区域柔性负荷参与功率调度的特点, 构建了以柔性负荷为控制对象, 以实现能源优化配置为目的的综合评价指标体系。其次, 利用熵值法对层次分析法确定的主观权重进行调整, 得到客观评价的组合权重。然后, 采用灰色关联分析法对不同种类负荷的功率调度参与度进行综合评价, 得到每类负荷在不同调度模式下的调度优先级。最后, 在某区域能源管控中心示范工程上进行验证, 所构建的评价体系指导区域内各类负荷参与功率调度, 减少电网高峰用电量, 维持电力系统可靠运行。

关键词: 柔性负荷; 功率调度; 评价体系; 熵权; 层次分析法; 灰色关联分析; 调度优先级

Evaluation system construction and application research of regional flexible load participation in power scheduling

MA Hongwei, ZHEN Lijing, MAO Jianrong, ZHANG Meng

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: It shows a huge potential for flexible load access area grid to participate in power scheduling so as to improve the power system regulation capability, but it also brings additional complexity in system power scheduling control. In order to solve this problem, it is urgent to build an objective, fair, accurate and effective comprehensive evaluation system, which can guide flexible loads to participate in power scheduling. Firstly, aiming at the characteristics of regional flexible load participating in power dispatching, a comprehensive evaluation index system with flexible load as control object and optimal allocation of energy as objective is constructed. Secondly, combined weights that objectively evaluated are obtained by adjusting subjective weights which are determined by analytic hierarchy process using entropy weight. Then, the grey relational analysis method is used to evaluate the power scheduling participation degree of different kinds of loads, and the priority of each load under different scheduling modes is obtained. Finally, it is verified in a regional energy control center demonstration project, the evaluation system can guide the various types of load in the region to participate in power scheduling, reduce the peak power consumption and maintain reliable operation of the power system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766206) and Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China "Research on Key Technologies of Distributed Coordinated Control for Intelligent Distribution Network with Multi-Source and Load Interaction".

Key words: flexible load; power scheduling; evaluation system; entropy weight; analytic hierarchy process; gray relational analysis; scheduling priority

0 引言

需求响应作为需求侧管理的重要组成部分^[1-2], 近年来受到越来越多的关注。柔性负荷响应是需求响应的主要研究方向^[3-4], 一般分为可中断负荷响应

和激励负荷响应, 它包含了用户侧对电力系统经济调度的满意度, 能够体现用户侧对调度的主观性。柔性负荷以实现负荷正常功能为前提, 通过调节用电规律参与电网控制^[5-6]。如文献[7]对源网荷三者间复杂互动情景下的电网控制进行了整体思考; 文献[8]分析了冰箱负荷与微网频率的关系; 文献[9]则将柔性负荷通过区域协调校正参与到主动配电网控制中。

柔性负荷接入区域电网参与调度, 改变了传统

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1766206); 国家电网公司总部科技项目“多源-荷互动的智能配电网分布式协调控制关键技术研究”

电网“发电跟踪负荷变化”的运行模式,可有效改善电力系统调节能力的不足,提高电网运行的安全性和经济性。但目前,同时计及电网安全可靠、电力公司和电力用户经济利益的前提下,柔性负荷在不同调度模式下的调度优先级的研究很少,所以迫切需要建立一套区域柔性负荷的综合评价体系来指导柔性负荷参与功率调度。本文针对区域柔性负荷参与功率调度的特点,构建了以柔性负荷为控制对象,以实现能源优化配置为目的的综合评价指标体系;利用熵值法对层次分析法确定的主客观权重进行调整,得到客观评价的组合权重;最后采用灰色关联分析法对不同种类负荷的功率调度参与度进行综合评价,得到每类负荷在不同控制策略下的控制优先级,并在实际工程中进行了验证。

1 柔性负荷参与功率调度

柔性负荷主要包括可中断负荷、可转移负荷、可调负荷等,它为电网的调峰提供了一种负荷管理措施,用以提高系统的可靠性和经济性^[10]。用户与电力公司签订负荷控制协议,在系统峰时或谷时的固定时段内或在电力公司要求的任何时段内,减少或者增加他们的用电需求,当用户按照协议减少其用电需求时,电力公司向用户支付一定费用以补偿其损失,当用户按照协议增加用电需求时,电力公司适当降低用户电价作为奖励,电力公司的补偿,奖励费率由电力公司与用户事先签订的合约决定。

柔性负荷具有以下显著特点:一是响应快,通过负荷控制等用户调度措施能够起到快速备用的作用;二是经济性高,能够缓解电厂扩建与调峰电源增加的投资压力;三是体现不同用户用电意愿,通过柔性负荷控制能够依据各类用户意愿改变用电方式,科学决策发用电资源配置。本文所研究的区域柔性负荷调度控制框架采用三层控制体系,即控制层、协调层、自治层。处于控制层中的调控中心用于生成柔性负荷的用电计划曲线并根据实时工况生成控制指令;处于协调层的负荷代理将控制指令分发至各个自治区域;自治区域接收负荷控制代理所下发的用电功率目标值指令,实时响应外界扰动,协调控制区域内部的柔性负荷参与功率调度。当自治区接收到用电功率目标值时,自治区内的柔性负荷将发挥其互动潜力来参与功率调度,调度模式如图1所示。

2 构建综合评价指标体系

柔性负荷参与系统调度就是以柔性负荷为控制

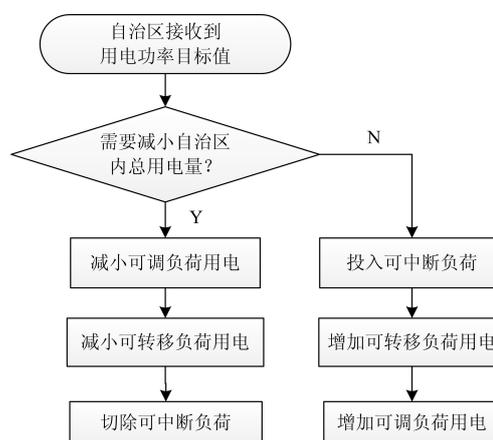


图1 柔性负荷参与功率调度的调度模式

Fig. 1 Scheduling model of flexible load participating power scheduling

对象,以实现能源优化配置为目的,基于此,本文选取了电网安全性、电力公司经济效益和电力用户经济效益作为柔性负荷参与功率调度的三个综合评价指标。

1) 电网安全性

大量柔性负荷接入区域电网参与功率调度在改善电力系统调节能力方面存在着巨大潜力,但也会给调度运行带来复杂的控制问题^[11]。考虑到柔性负荷响应的随机性、自主性与无序性给电网运行带来的不确定性,本文选取了图2所示的最大负荷可利用小时数、非计划停运小时、强迫停运小时、平均负荷、负荷点故障率、负荷点每次故障平均停电持续时间、系统平均供电可用率和投切负荷对电网稳定性的影响作为评价电网安全可靠的指标。

2) 电力公司经济效益

在需求响应过程中,电力公司往往会提供一定的补偿机制来激励用户响应,并对合同内未做出响应的用户进行惩罚,故选取了系统运行成本、中断启停成本指标;根据电网供需平衡,组织实施调控,故选取柔性负荷响应速度、电网负荷率、系统平均线损率、系统损耗改善程度、停电经济损失变化率指标^[12-13];必要时电力公司需要进行设备投资,故选取设备维护成本指标。

3) 电力用户经济效益

电力用户根据当前电价和激励政策,参与电力公司组织的负荷调控工作^[14],故选取了负荷参与调控的投资成本、柔性负荷的停电损失指标;用户与电力公司签订负荷控制协议,当用户按照协议减少其用电需求时,电力公司向用户支付一定费用以补偿其损失,故选取了柔性负荷的补偿电价指标;当

用户按照协议增加用电需求时，电力公司适当降低用户电价作为奖励，故选取了负荷用电成本指标；当用户未按照协议增加或者减少用电量时，将进行

惩罚，故选取用户违约罚金指标。

构建的区域柔性负荷参与功率调度的综合评价指标体系见图 2。

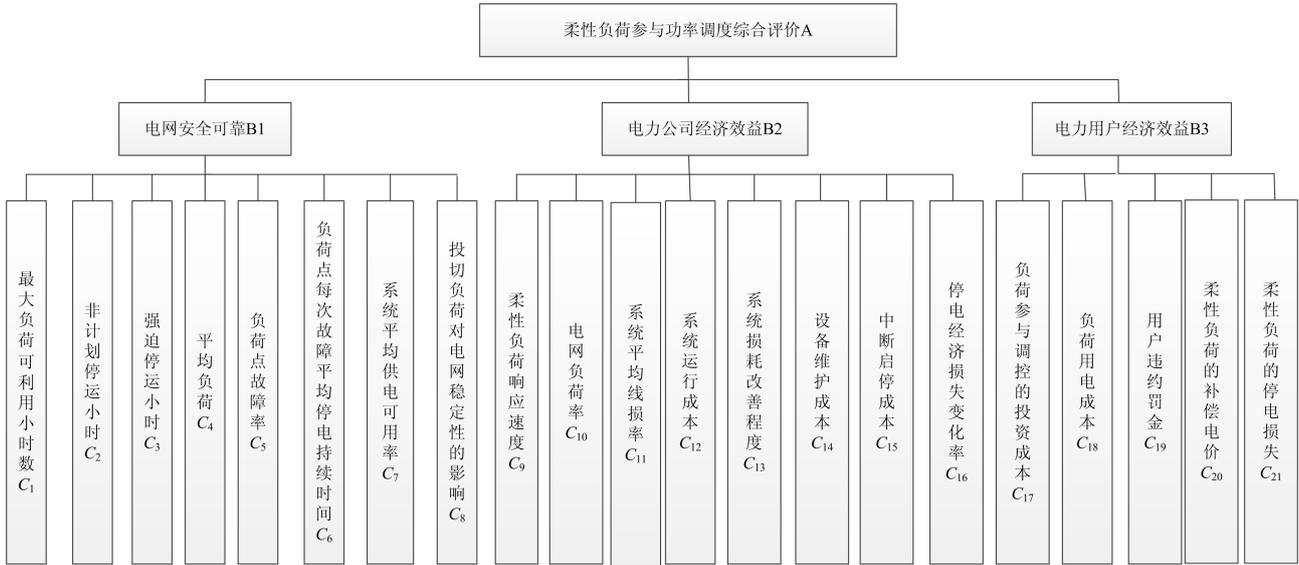


图 2 柔性负荷参与功率调度综合评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system for flexible load participating power scheduling

3 乘法组合法确定指标权重

3.1 权重的确定

合理的指标权重对于综合评价结果的准确性有决定性的作用。权重的确定方法不外乎有两种：主观赋权法和客观赋权法。主观赋权是由专家或评价者根据指标的经济意义或者技术意义凭经验主观判断得到的，易受决策者的知识结构和个人经验影响。而客观赋权是根据指标数据差异程度提供的信息确定的，可以有效避免主观因素的影响，但客观赋权可能会与专家的认识相悖。为了克服上述主客观赋权法的不足，本文采用层次分析法^[15]和熵权^[16]相结合的乘法组合赋权法^[17-19]。即用熵值法确定的客观权重对由 AHP 确定的主观权重进行调整，组合权重计算公式为

$$W = \frac{w_{\text{AHP}_j} h_j}{\sum_{j=1}^n w_{\text{AHP}_j} h_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： w_{AHP_j} 为 AHP 法确定的主观权重； h_j 为熵值法确定的客观权重。

3.2 AHP 确定主权重

本文采用 AHP 确定各指标的主权重，其主要步骤如下。

1) 将评价问题按其内部的逻辑关系分解，建立层次递阶结构。

2) 构造判断矩阵。层次递阶结构建立后就意味着确定了上下层元素之间的隶属关系，将上一层次的元素作为准则，对其下层次中的元素进行两两比较，构造判断矩阵。

3) 求判断矩阵的特征值和特征向量。计算满足 $AW = \lambda_{\text{max}} W$ 的特征根和特征向量，对 W 进行归一化处理即为各对应元素的权值， λ_{max} 为判断矩阵 A 的最大特征根。

4) 进行一致性检验。计算 $C_R = \frac{C_1}{R_1}$, $C_1 = \frac{(\lambda_{\text{max}} - m)}{m - 1}$, R_1 是随一致性指标， C_R 是一致性指标。当 $C_R < 0.1$ 时，认为判断矩阵 A 满足一致性，其评价结果可以接受，否则重新赋值修正。

3.3 熵值法确定客观权重

熵值法是一种依据各指标值所包含的信息量的多少来确定指标权重的客观赋权法。熵是信息论中测度系统不确定性的量。如果某个指标的熵越小，就说明该指标值的变异程度越大，提供的信息量也就越多，在综合评价中所起的作用越大，则该指标的权重也应越大，反之亦然。其主要步骤如下。

1) 构建具有 m 个对象 n 项指标的评价矩阵

$$X = (x_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中， x_{ij} 为第 i 个对象关于第 j 个指标的属性值。

2) 标准化指标矩阵

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中, P_{ij} 即第 i 个对象关于第 j 个指标的贡献度。

3) 求各指标的熵 E_j

$$E_j = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}}{\ln m} \quad (4)$$

可见 $0 \leq E_j \leq 1$ 熵 E_j 也表示所有对象关于第 j 个指标的贡献总量。

4) 求各指标的权系数 h_j

$$h_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}, j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

熵权 h_j 越大, 该指标代表的信息量就越大, 表示该指标对综合评价的作用越大。

4 灰色关联分析法综合评价

本文将熵权法和灰色关联度结合应用于柔性负荷参与功率调度综合评价问题。采用熵权法可以充分利用客观数据所提供的信息来确定客观权重, 去除主观性影响。灰色关联分析是建立在充分利用客观数据的基础上, 得到各个方案与最优理想方案的接近度, 从而进行决策。灰色关联分析法能够处理信息不完全明确的灰色系统, 对于小样本无规律指标的评价问题决策准确性较高, 因此灰色关联分析法适用于柔性负荷参与功率调度综合评价。原始的灰色关联法在计算关联度时采用平权处理或者专家赋权, 使权重存在一定的主观性, 而熵可以反映随机变量的不确定性能信息量, 所以结合熵权法用熵权确定权重将使结果更加客观。

设有 n 个对象, 每个对象有 m 项指标, 对评价指标数据进行规范化处理, 规范化后的数据为 $x_1, x_2, \dots, x_m, x_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(m)], i=1, 2, \dots, m$ 。本文以 $x_0 = \{1, 1, \dots, 1\}$ 作为理想方案。 x_0 与 x_i 关于第 k 个元素的关联系数为

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta \min + \rho \Delta \max}{\Delta_i(k) + \rho \Delta \max} \quad (6)$$

$$i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$$

式中:

$$\Delta \min = \min_j \min_k |x_0(k) - x_j(k)|;$$

$$\Delta \max = \max_j \max_k |x_0(k) - x_j(k)|;$$

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|;$$

ρ 为分辨系数, 一般取 $\rho=0.5$ 。则第 i 个评价方案与理想方案的关联度为

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^m W_k \xi_i(k) \quad (7)$$

5 应用

本文以某区域能源管控中心示范工程为例, 该区域内包括单台风机、光伏电池阵列、2 台微型燃气轮机(MT)、1 台燃料电池(FC)和铅酸蓄电池, 供电负荷为 1 栋行政办公楼、1 个小型学生洗衣房、1 个电动汽车充电桩、1 栋综合实验楼、4 栋公共教学楼、食堂及 8 栋 6 层宿舍楼, 总用电负荷为 600 kW, 其中可调负荷用电为: 1 栋行政办公楼、1 栋综合实验楼、4 栋公共教学楼、食堂、1 台燃料电池(FC)和铅酸蓄电池; 可切负荷用电为: 8 栋 6 层宿舍楼; 可转移负荷用电为: 1 个小型学生洗衣房、1 个电动汽车充电桩。其接线示意图如图 3 所示。用本文构建的综合评价指标体系对各类柔性负荷参与功率调度的调度优先级进行评价, 实际应用表明得到的各类负荷的调度优先级可以有效地减少电网高峰用电量, 维持电力系统可靠运行。

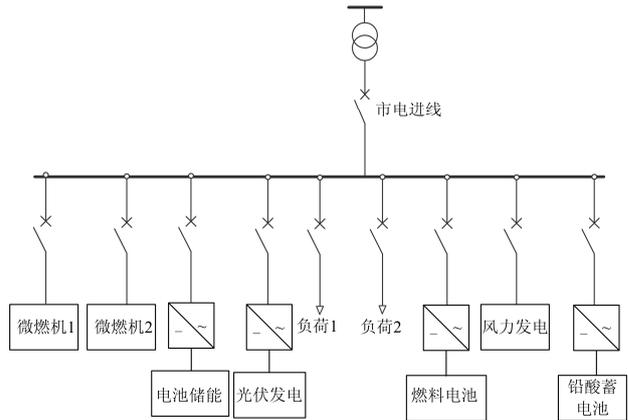


图 3 示范工程主接线图

Fig. 3 Main wiring graph of demonstration project

5.1 需要减小自治区内总用电量时柔性负荷控制策略

1) 基于 AHP 确定主观权重

当需要减小自治区内总用电量时, 需要先减小可调负荷用电, 区域能源管控中心中的可调负荷用电为 1 栋行政办公楼、1 栋综合实验楼、4 栋公共教学楼、食堂, 先调哪个负荷采用问卷调查的方式咨询相关专家的意见。通过调查得到专家对指标两两重要性的比较, 形成 B 层指标相对于 A 层指标的相对重要性以及 C 层指标相对于 B 层指标的相对重要性的原始判断矩阵。根据原始判断矩阵得到了基于 AHP 法确定的主观权重结果如下。

$$\begin{cases} w_A = \{0.2899, 0.1298, 0.1703\} \\ w_{AHP-B1} = \begin{cases} 0.1059, 0.2931, 0.1748, 0.0714 \\ 0.3807, 0.1904, 0.1807, 0.3419 \end{cases} \\ w_{AHP-B2} = \begin{cases} 0.2179, 0.0378, 0.1227, 0.0828 \\ 0.0624, 0.0828, 0.0624, 0.1227 \end{cases} \\ w_{AHP-B3} = \begin{cases} 0.1914, 0.3673, 0.1112, 0.2547 \\ 0.1754 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

2) 基于熵权法确定的权重

$$\begin{cases} h_{B1} = \begin{cases} 0.1715, 0.1001, 0.0002, 0.1230 \\ 0.1466, 0.091, 0.2981, 0.3145 \end{cases} \\ h_{B2} = \begin{cases} 0.0017, 0.3644, 0.0823, 0.0002 \\ 0.0025, 0.3671, 0.0158, 0.0520 \end{cases} \\ h_{B3} = \begin{cases} 0.1796, 0.1456, 0.1135, 0.2479 \\ 0.3267 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

3) 组合权重的确定

$$\begin{cases} w_{B1} = \begin{cases} 0.0321, 0.3110, 0.1002, 0.1003 \\ 0.1667, 0.0678, 0.1432, 0.1108 \end{cases} \\ w_{B2} = \begin{cases} 0.1179, 0.1379, 0.1327, 0.0628 \\ 0.0824, 0.0728, 0.2624, 0.4234 \end{cases} \\ w_{B3} = \begin{cases} 0.0114, 0.2813, 0.2172, 0.1507 \\ 0.2794 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

4) 对各个一级指标进行初级综合评价

首先对电网安全可靠进行一级评价, 计算关联度:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= w_{B1} \xi_1 = \\ & [0.5467, 0.6589, 0.8754, 0.9821, \\ & 0.7124, 0.8902, 0.8718] \end{aligned} \quad (11)$$

同理, 对电力公司效益进行一级评价得到关联度:

$$\gamma_2 = [0.5467, 0.6589, 0.8754, 0.9821, 0.7124, 0.8902, 0.8718] \quad (12)$$

对电力用户经济效益进行一级评价得到关联度:

$$\gamma_3 = [0.9821, 0.7124, 0.8902, 0.5634, 0.6577, 0.8103, 0.9328] \quad (13)$$

5) 二级综合评价

将上述得到的 3 个一级指标下的关联度进行加权合成可得

$$\begin{aligned} \gamma &= [w_{B1}, w_{B2}, w_{B3}] [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3]^T = \\ & [0.6745, 0.8603, 0.9068, 0.6789, 0.8956 \\ & 0.9452, 0.6751, 0.9865, 0.5684] \end{aligned} \quad (14)$$

由关联度大小可知: 需要先减小可调负荷用电时, 调节可调负荷的顺序为

公共教学楼 3, 公共教学楼 2, 公共教学楼 1, 1 栋行政办公楼, 公共教学楼 4, 1 栋综合实验楼, 食堂, 1 个铅酸蓄电池, 1 台燃料电池。

同理可计算需要减小可转移负荷用电时, 可转移负荷的关联度大小为

$$\gamma = [0.9068, 0.7759] \quad (15)$$

所以调节可转移负荷的顺序为: 1 个小型学生洗衣房, 1 个电动汽车充电桩。

同理可计算需要切除可切负荷时, 可切负荷的关联度大小为

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0.7745, 0.9603, 0.6068, 0.8789, \\ 0.8256, 0.9756, 0.6751, 0.9865 \end{bmatrix} \quad (16)$$

所以切除可切负荷的顺序为: 宿舍楼 6, 宿舍楼 7, 宿舍楼 8, 宿舍楼 3, 宿舍楼 2, 宿舍楼 4, 宿舍楼 5, 宿舍楼 1。如图 4 所示。

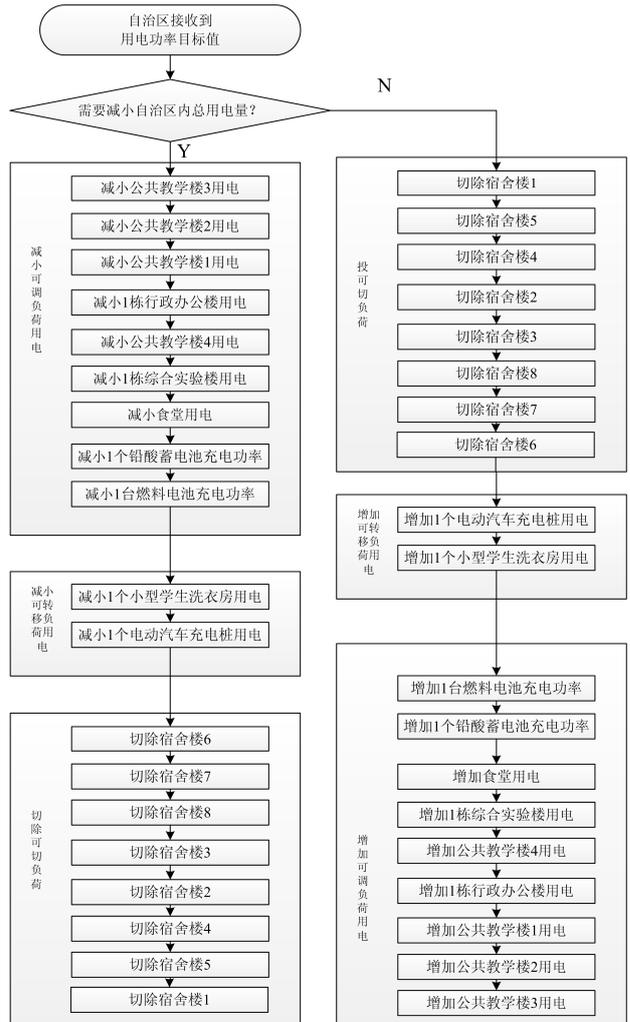


图 4 柔性负荷在不同调度模式下的调度优先级

Fig. 4 Scheduling priority of flexible loads under different scheduling modes

5.2 柔性负荷控制策略

按照 5.1 节中的流程可得需要增加自治区内总用电量时柔性负荷控制策略, 由评价结果可得: 每类柔性负荷在不同调度模式下的调度优先级如图 4 所示。柔性负荷参与系统调度以电网安全可靠、电力公司经济效益和电力用户经济效益作为评价指标, 所以柔性负荷在不同调度模式下的调度优先级考虑了电网安全可靠、电力公司和电力用户的经济效益, 可以减少电网高峰用电量, 实现能源的优化配置, 维持电力系统可靠运行, 有一定的经济效益和社会效益。

6 结论

本文构建了以柔性负荷为控制对象, 以实现能源优化配置为目的的综合评价指标体系; 利用熵值法对层次分析法确定的主观权重进行调整, 得到客观评价的组合权重; 采用灰色关联分析法对不同种类负荷的功率调度参与度进行综合评价, 得到每类负荷在不同调度模式下的调度优先级。在某区域能源管控中心示范工程上进行验证, 本文所构建的评价体系指导区域内各类负荷参与功率调度, 减少电网高峰用电量, 维持电力系统可靠运行。

参考文献

- [1] BIE Zhaohong, XIE Haipeng, HU Guowei, et al. Optimal scheduling of power systems considering demand response[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 180-187.
- [2] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
BIE Zhaohong, HU Guowei, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [3] 康守亚, 李嘉龙. 考虑峰谷分时电价策略的源荷协调多目标发电调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 83-89.
KANG Shouya, LI Jialong. Multi-objective generation scheduling model of source and load considering the strategy of TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 83-89.
- [4] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动相应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3661-3673.
- [5] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [6] 荀挺, 胡文斌, 张珂珩. 地区电网“网-荷”双向互动应用软件设计及其关键技术分析[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 33-42.
XUN Ting, HU Wenbin, ZHANG Keheng. Design and key technologies of regional grid “grid-load” interaction applications software[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 33-42.
- [7] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [8] 贾宏杰, 戚艳, 穆云飞. 基于家居型温控负荷的孤立微电网频率控制方法[J]. 中国科学, 2013, 43(3): 247-256.
JIA Hongjie, QI Yan, MU Yunfei. Frequency response of autonomous microgrid based on family-friendly controllable loads[J]. Sci China Tech Sci, 2013, 43(3): 247-256.
- [9] 于汀, 刘广一, 蒲天娇, 等. 计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 95-100.
YU Ting, LIU Guangyi, PU Tianjiao, et al. Coordinated optimization control of active distribution considering flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 95-100.
- [10] 杨楠, 王波. 考虑柔性负荷调峰的大规模风电随机优化调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 231-238.
YANG Nan, WANG Bo. Large-scale wind power stochastic optimization scheduling method considering flexible load peaking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 231-238.
- [11] 张建华, 曾博, 张玉莹. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying. Key issues and research prospects of active distribution network planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2014, 29(2): 13-23.
- [12] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [13] 顾煜炯, 耿直, 张晨. 聚光太阳能热发电系统关键技术综述[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 6-13.
GU Yujiong, GENG Zhi, ZHANG Chen. Review on key technologies of concentrating solar thermal power generation systems[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 6-13.
- [14] 罗滇生, 杜乾. 基于负荷分解的居民差异化用电行为特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 29-33.
LUO Diansheng, DU Qian. Analysis of differentiation residential electricity consumption characteristic based on power load decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 29-33.
- [15] 张宏亮, 肖振东. 基于 AHP 的公共环境投资项目效益审计评价指标体系的构建[J]. 审计研究, 2007(1): 31-33.
ZHANG Hongliang, XIAO Zhendong. The construction of performance auditing & evaluation system for public environmental invest project based on AHP[J]. Auditing Research, 2007(1): 31-33.
- [16] 陈立荣, 郭继伟, 王敬敏. 基于熵权的灰色关联分析在电力企业竞争力评价中的应用[J]. 电力学报, 2005, 20(4): 359-361.
CHEN Lirong, GUO Jiwei, WANG Jingmin. Application of the gray relevant analysis based on entropy in evaluating competition of power enterprises[J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(4): 359-361.
- [17] 张翼舟, 白泉涌. 基于组合权重的火电项目环境影响后评价研究[J]. 华东电力, 2010, 38(5): 668-670.
ZHANG Yizhou, BAI Quanyong. Environmental impact post evaluation for thermal power project based on combinational weight[J]. East China Electric Power, 2010, 38(5): 668-670.
- [18] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [19] 雷庆生, 鄢晶, 方仍存. 改进型中心点三角白化全函数在县域配电网综合评价中的应用[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 56-60.
LEI Qingsheng, YAN Jing, FANG Rengcun. Application of modified center point triangular whitenization weight function in comprehensive evaluation of county distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 56-60.

收稿日期: 2017-08-21; 修回日期: 2017-10-27

作者简介:

马红伟(1974—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为微电网、新能源、分布式发电等方面的自动化分析与控制技术;

甄立敬(1988—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为微电网、新能源、分布式发电等方面的自动化分析与控制技术; E-mail: 1846242143@qq.com

毛建容(1975—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为微电网、新能源、分布式发电等方面的自动化分析与控制技术。

(编辑 葛艳娜)