

灰色关联度在微网成本-效益中的应用

周长特

(衡水科技工程学校, 河北 衡水 053000)

摘要: 将灰色关联度应用于微网成本-效益的分析, 量化成本-效益与各因素间关联程度。综合考虑分布式能源拆卸、治污、负荷停电赔偿费用以及碳贸易、可靠性效益等因素, 建立了微网成本-效益结构体系。通过分析算例中4种微网方案成本-效益与指标间的关联程度, 验证了该方法的可行性。研究结果可为微网投资决策提供科学依据。

关键词: 微网; 成本-效益; 灰色关联度

Abstract: The grey relational degree (GRD) is proposed to analyze the cost-benefit of microgrid so as to quantify the degree of association between cost-benefit and various factors. The costs of disassembly, pollution control and outage compensation for the distributed energy resources (DER) are comprehensively considered as well as the benefits of carbon trading and reliability, and the structure system of the cost-benefit for microgrid is established. Through relational degree between cost-benefit and index in four microgrid schemes, the feasibility of the proposed method is verified. The research results might provide the scientific basis for investment decision of microgrid.

Key words: microgrid; cost-benefit; grey relational degree

中图分类号: TM774 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)05-0055-04

0 引言

微网是由分布式能源(distributed energy resource, DER)、控制装置以及负荷等组成的可控单元。微网在节能减排、提高可再生能源利用率、延缓电网建设投资、提高用户供电可靠性等方面带来了良好的经济效益和社会效益^[1];与常规能源相比,分布式能源具有较高一次性投资以及逐年运行维护费用、废弃后拆卸与治污费用等特点。结合微网特点,深入研究微网的成本效益构成,分析成本-效益与各自指标间关联度从而从矛盾主要方面着手减少成本、增加效益,对微网的建设投资和微网运行都具有重要的意义和工程应用价值。

灰色关联度分析对系统数据序列的几何关系进行比较分析获得各因素间的关联程度^[2]。目前,该方法已经应用于输电网经济运行^[3]、电网规划决策^[4]、高压输电线路覆冰状况研究^[5]等方面。

综合考虑各方面因素全面量化微网的成本、效益,构造微网成本-效益体系,并利用灰色关联度来量化各因素间关联程度。研究思路考虑了分布式能源废弃后拆卸、治污费用、停电赔偿费用以及碳贸易

效益、可靠性效益等因素,研究成果可为微网投资决策提供理论依据。

1 灰色关联度分析

灰色关联度分析法基于中国学者邓聚龙提出的灰色系统理论,是一种多因素统计分析方法,通过几何关系进行比较分析各元素之间的关系,找出影响系统最重要的元素,把握矛盾的主要方面,从而有效地控制整个系统的运行^[2]。通过灰色关联度分析微网成本、效益与各自指标间灰色关联度,从主导方面着手来减少成本、增加效益。灰色关联度分析法包含以下6个步骤。

(1) 构建层次结构

建立微网成本-效益层次结构,形成目标层、指标层。

(2) 均值化数据

$$x'_i(k) = \frac{x_i(k)}{\bar{x}_i} \quad \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_i(k) \quad (1)$$

式中 m 为方案数目; $x_i(k)$ 为在第 k 种方案下第 i 个指标值; \bar{x}_i 为第 i 个指标的期望; $x'_i(k)$ 为均值化的值。

(3) 计算各比较数列同参考数列的绝对差

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)| \quad (2)$$

式中 $\Delta_i(k)$ 为绝对差; $x'_0(k)$ 为第 k 种方案下参考数列值; $x'_i(k)$ 为第 i 个指标值。

(4) 找出两极最大差与最小差

$$\Delta(\max) = \max_i \max_k \Delta_i(k) \quad (3)$$

$$\Delta(\min) = \min_i \min_k \Delta_i(k) \quad (4)$$

(5) 求关联系数

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_i(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (5)$$

式中 $\gamma_{0i}(k)$ 为第 k 种方案下第 i 个指标的关联系数; ρ 为分辨系数(这里取 0.5)。

(6) 求灰色关联度

$$\gamma_{0i} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \gamma_{0i}(k) \quad (6)$$

式中 γ_{0i} 为参考指标与第 i 个指标间的灰色关联度。

3 构建微网成本-效益层次结构^[6]

综合考虑分布式能源的产品生命周期(product life cycle, PLC)、运行经济状况以及对环境的影响等因素确定了成本、效益指标层各个指标,构建了图2所示的微网成本-效益层次结构。

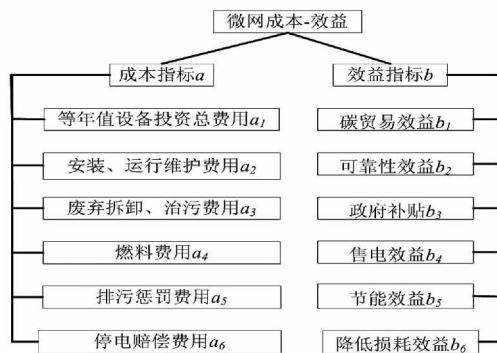


图1 成本-效益层次结构

3.1 微网成本指标体系

式(7)~式(11)中 i 为第 i 种分布式能源; n 为微网所含分布式能源种类数。

(1) 等年值设备投资总费用 a_1

考虑逐年投资成本能够体现市场运行状况。分布式能源投资包含一次、二次设备。

$$a_1 = \sum_{i=1}^n C_{CPI} = \sum_{i=1}^n (C_{TCPI} + C_{SCPI}) \frac{r(1+r)^{Y_{pi}}}{(1+r)^{Y_{pi}} - 1} \quad (7)$$

式中 C_{CPI} 为等年值设备投资费用 \$; C_{TCPI} 为等年值装机成本 \$; C_{SCPI} 为等年值二次设备成本 \$; Y_{pi} 为

寿命周期年限 a ; r 为折现率, %。

(2) 安装、运行维护费用 a_2 ^[7]

$$a_2 = \sum_{i=1}^n C_{OMi} = \sum_{i=1}^n \{ (K_{ii} + K_{omi}) P_i + \sum_{j=1}^{N_{SUCi}} \left[\xi_i + \delta_i \left[1 - \exp\left(-\frac{T_{offij}}{\tau_i}\right) \right] \right] \frac{r(1+r)^{Y_{pi}}}{(1+r)^{Y_{pi}} - 1} \} \quad (8)$$

式中 C_{OMi} 为安装、运行维护费用 \$; P_i 为装机容量 kW; K_{ii} 为安装单位容量费用 \$ / kW; K_{omi} 为比例系数 \$ / (kW · a); ξ_i 为热启动费用 \$; δ_i 为冷启动费用 \$; N_{SUCi} 为启停次数; τ_i 为冷启动时间, h; T_{offij} 为第 j 次启动前停运时间, h。

(3) 废弃后拆卸、治污费用 a_3

考虑产品生命周期计算废弃后的费用

$$a_3 = \sum_{i=1}^n C_{Di} = \sum_{i=1}^n (K_{di} + K_{pi}) p_i \frac{r(1+r)^{Y_{pi}}}{(1+r)^{Y_{pi}} - 1} \quad (9)$$

式中 C_{Di} 为拆卸、治污费用 \$; K_{di} 为拆卸单位装机容量费用 \$ / kW; K_{pi} 为治理单位装机容量污染所需费用 \$ / kW; P_i 为装机容量 kW。

(4) 燃料费用 a_4

$$a_4 = \sum_{i=1}^n C_{FCi} = \sum_{i=1}^n M_{Ci} P_{Ci} E_i \quad (10)$$

式中 C_{FCi} 为燃料费用 \$; M_{Ci} 为单位电能消耗燃料量 g / (kW · h) (m³ / (kW · h)); P_{Ci} 为单位燃料的价格 \$ / t (\$ / m³); E_i 为发电量 kW · h。

(5) 排污惩罚费用 a_5

$$a_5 = \sum_{i=1}^n C_{Ei} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m E_i V_k \quad (11)$$

式中 C_{Ei} 为排污惩罚费用 \$; m 为污染物种类; E_i 为发电量 kW · h; V_k 为单位发电量排放第 k 种污染物所受罚款 \$ / (kW · h)。

表1 各发电技术单位发电量污染物排放罚款表

	DER	NO _x	CO ₂	CO	SO ₂
风机 (光伏阵列)	0	0	0	0	0
微型燃气轮机	0.154 75	0.23	0.003 4	0.000 116	
燃料电池	0.005 75	0.793 75	0.001 08	0	
内燃机	0.108 25	0.29	0.046 4	0.058	

(6) 停电赔偿费用 a_6

$$a_6 = C_s = \sum_{j=1}^m \lambda_j L_j T_j \sum_{k=1}^n K_{ks} \Delta P_k \quad (12)$$

式中 C_s 为停电赔偿费用 \$; m 为微网与大电网相连的馈线数; λ_j 为单位馈线故障的概率, %; L_j 为馈线的长度 km; T_j 为维修时间, h; n 为负荷种类; K_{ks} 为第 k 种负荷停电损失费用 \$ / (kW · h); ΔP_k 为

第 k 种负荷停电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

3.2 微网效益指标体系

(1) 碳贸易效益 b_1

根据碳排放权交易机制 (emissions trading scheme, ETS) 企业在规定时间内碳的排放量低于监管机构分配的量可将剩余的出售给排放水平高的企业来获得利润; 而光伏发电、风机发电属于清洁发展机制 (clean development mechanism, CDM) 范畴。这里采用可再生能源电源相对于火电机组发相同电量少排放 CO_2 进行交易。

$$b_1 = \sum_{i=1}^m C_{Ci} = \alpha M_C \rho \sum_{i=1}^m E_i \quad (13)$$

式中 m 表示微网包含可再生能源电源种类数; α 为单位煤碳转换为二氧化碳系数 (这里取 $44/12$); E_i 为第 i 种可再生能源电源发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$; M_C 为火电机组生产单位电能所消耗的煤炭量 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; ρ 为单位碳交易费用 $\$/\text{t}$ 。

(2) 可靠性效益 b_2

考虑到与大电网相连的输电线路发生故障时, 微网内的分布式能源仍持续向负荷供电, 从而提高了微网供电可靠性。

$$b_2 = \sum_{i=1}^n C_{Ri} = \sum_{j=1}^m \lambda_j L_j \sum_{i=1}^n K_{is} P_{ij} \quad (14)$$

式中, C_{Ri} 为第 i 种负荷的可靠性效益, $\$$; n 为负荷种类; m 为微网与大电网相连的馈线数; λ_j 为单位馈线故障的概率, $\%$; L_j 为馈线的长度, km ; T_j 为维修时间, h ; K_{is} 为第 i 种负荷单位停电损失, $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$; P_{ij} 为第 j 条馈线连接下由分布式能源供给第 i 种负荷的电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(3) 政府补贴效益 b_3

《分布式发电管理办法》明确分布式发电以单位发电量方式获得补贴。

$$b_3 = \sum_{i=1}^n C_{Bi} = \sum_{i=1}^n p_{bi} E_i \quad (15)$$

式中 n 为微网所含分布式电源种类; p_{bi} 为第 i 种分布式电源的补贴电价 $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$; E_i 为第 i 种分布式电源的发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(4) 售电效益 b_4

$$b_4 = \sum_{i=1}^n C_{Si} = \sum_{i=1}^n p_{si} E_i \quad (16)$$

式中 p_{si} 为第 i 种分布式电源售电电价 $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$; E_i 为第 i 种分布式电源发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(5) 节能效益 b_5

利用可再生能源发电减少化石能源消耗带来的

费用, 以常规火电机组发电消耗煤炭费用作为参考。

$$b_5 = M_C p_c \sum_{i=1}^m E_i \quad (17)$$

式中 m 为微网含有的可再生能源电源种类; M_C 为火电机组生产单位电能所消耗的煤炭量 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; p_c 为煤炭价格 $\$/\text{t}$; E_i 为第 i 种可再生能源电源发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(6) 降低损耗效益 b_6

分布式能源配置于负荷附近减少了集中式远距离供电在网络传输上的损耗^[1]。

$$b_6 = \sum_{i=1}^n V_{LRi} = L\% \sum_{i=1}^n E_i p_{si} \quad (18)$$

式中 $L\%$ 为降损率, $\%$; E_i 为第 i 个分布式电源的发电量 $\text{kW} \cdot \text{h}$; p_{si} 为第 i 种分布式电源售电电价 $\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

4 实例分析

依托图3所示的微网示意图^[8]确定了微网含风/光/储、微网中没有风机、微网中没有光伏阵列、微网中没有储能装置(以下简称微网1、微网2、微网3、微网4)等4种方案。针对4种微网方案年运行状况进行了成本、效益与各自指标间灰色关联度。

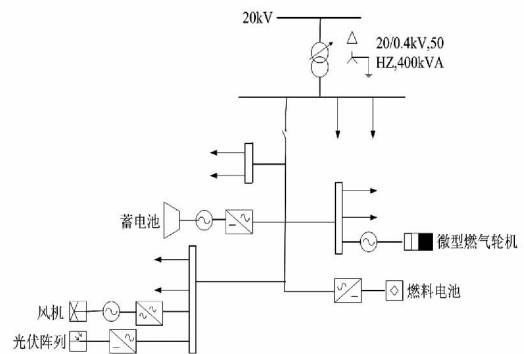


图2 微网示意图

4.1 微网的成本分析

4.1.1 求解4种微网方案的成本

假设微网内工业、商业、农业、居民负荷所占比重依次为 79.1、13.4、2.4、5.1(%) 以及工业、商业、农业、居民生活负荷停电赔偿费用依次为 1.817、1.710 4、0.129 8、0.096 4($\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$)^[9]; 分布式电源光伏、风机、燃料电池、微型燃气轮机、蓄电池的运行时间依次为 1 500、3 000、6 500、6 500、500(h) 以及二次设备成本依次为装机费用的 8%。其他参数如表2 以及 DER 参数状况如表3 4 种方案的各项成本指标值如表4 所示。

表2 分布式能源成本的相关数据

参数	数值
折现率 $r / \%$	6.7
馈线上发生故障率 $/(\text{次} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{a}^{-1})$	0.052 5
馈线长度 $/\text{km}$	50
停电维修时间 $/\text{h}$	4
天然气的发热量 $/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	35 160
天然气价格 $/(\$ \cdot \text{m}^{-3})$	0.22
微网的负荷 $/\text{kW}$	80

4.1.2 灰色关联度分析

以4种微网方案的成本总成本值作为参考数列,求得与6个成本指标灰色关联度依次为0.722、0.713、0.859、0.713、0.713、0.585。算例的结果表

表3 分布式能源的各指标参数

DER	机组容量 $/\text{kW}$	装机费用 $/(\$ \cdot \text{kW}^{-1})^{[11]}$	寿命 $/\text{a}$	安装费用 $/(\$ \cdot \text{kW}^{-1})^{[6]}$	运行维护费用 $/(\$ \cdot \text{kW}^{-1})^{[6]}$	拆卸、治污费用 $/(\$ \cdot \text{kW}^{-1})$
光伏阵列	10	5 175	25	1 500	14.3	358.8
风机	10	2 805	15	3 250	5.7	216.7
燃料电池	30	3 500	10	3 000	26.5	375.0
微型燃气轮机	30	1 200	12.5	1 333	26.5	88.9
蓄电池	10	1 100	4	200	7	68.3

注:表中拆卸、治污费用按照安装费用的6.7%与对环境造成影响按装机费用5%之和计算。

表4 4种微网方案成本的各指标值

方案	微网1	微网2	微网3	微网4
等年值设备投资总费用 $a_1 / \$$	32 026.5	28 763.1	27 359.4	28 542.9
安装、运行维护费用 $a_2 / \$$	23 047.0	19 539.8	21 782.4	22 440.0
废弃后拆卸、治污费用 $a_3 / \$$	2 634.5	2 401.1	2 335.0	2 434.2
燃料费用 $a_4 / \$$	8 785.0	8 785.0	8 785.0	8 785.0
排污惩罚费用 $a_5 / \$$	231.8	231.8	231.8	231.8
停电赔偿费用 $a_6 / \$$	745.9	837.7	791.8	812.9

表5 分布式能源效益的相关数据

参数	数值
火电厂机组生产 单位电能所消耗的煤炭量 $/(\text{g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	357
煤碳价格 $/(\$ \cdot \text{t}^{-1})$	100
单位碳交易费用 $/(\$ \cdot \text{t}^{-1})$	10
降损率 $/\%$	5

4.2.2 灰色关联度分析

以4种微网方案的效益值作为参考数列,求得与6个效益指标灰色关联度依次为0.533、0.818、0.906、0.906、0.533、0.906。结果表明,算例微网的

明,微网的成本与废弃后拆卸、治污费用关联度最大,与停电赔偿费用关联度最小,与其他费用关联度处于同一水平。

由算例分析得,应着重从废弃后拆卸、治污费用以及等年值设备投资费用入手,从而较大减少微网整体投资的成本。

4.2 微网的效益分析

4.2.1 求解4种微网方案的效益

设光伏阵列、风机、燃料电池、微型燃气轮机售电价依次为0.189、0.086 5、0.078 6、0.070 8($\$/(\text{kW} \cdot \text{h})$)^[10],相应补贴电价为售电电价的25%。根据以上的数据可以得4种方案效益的各项指标值,如表6。

效益与政府补贴效益、售电效益、降低损耗效益关联度最大且处于同一水平。

由算例分析得,应着重从政府补贴效益、售电效益、降低损耗效益入手,从而可以获取较大微网整体的效益。

5 结 论

构建了微网成本-效益结构,采用灰色关联度分析法分析了微网成本、效益与各自指标间的关联

(下转第78页)

另外两种接地方式都存在 OPGW 接线盒安装位置选取的问题,且维护检修时必须先对 OPGW 可靠接地,安全性要求较高。

参考文献

[1] 黄旭峰. 光纤复合架空地线接地方式的改进[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 356-364.
[2] 胡毅, 刘凯. 输电线路 OPGW 接地方式的分析研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1885-1888.
[3] 吴康平. 500 kV 线路绝缘地线的设计[J]. 电力建设, 2001, 22(11): 11-13.

[4] 张殿生主编. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
[5] 吴维韩, 张芳榴, 等著. 电力系统过电压数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
[6] 傅宾兰. 光纤复合架空地线 OPGW 的运行状况和防雷[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 29-34.

作者简介:

陈超(1985), 男, 硕士, 研究方向为电力系统自动化;
廖民传(1983), 男, 工程师, 研究方向为电力系统自动化。

(收稿日期: 2013-03-26)

(上接第 58 页)

表 6 4 种微网方案效益的各指标值

方案	微网 1	微网 2	微网 3	微网 4
碳贸易效益 b_1	5 890.5	1 963.5	3 927	5 890.5
可靠性效益 b_2	349.3	326.4	337.9	332.6
政府补贴效益 b_3	8 640.8	7 992.0	7 932.0	8 640.8
售电效益 b_4	34 563.0	31 968.0	31 728.0	34 563.0
能耗效益 b_5	1 606.5	535.5	1 071.0	1 606.5
降低损耗效益 b_6	1 728.2	1 598.4	1 586.4	1 728.2

程度。通过对算例 4 种微网方案进行成本-效益与各自指标间的关联度分析,验证了该方法的可行性。由于废弃拆卸、治污、停电赔偿费用等指标目前尚无标准可循,算例参考相关文献确定指标值。另外分布式能源装机容量、采用技术的成熟度不同,成本差别也很大。关于微网结构及其成本-效益最优问题将在后期工作中进一步研究与探讨。

参考文献

[1] 梁惠施, 程林, 苏剑. 微网的成本效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(增刊): 38-44.
[2] DENG Ju-long. Introduction to Grey System Theory[J]. Journal of Gray System, 1988, 1(1): 1-24.
[3] 马丽叶, 卢志刚, 常磊, 等. 基于灰色关联度的输电网经济运行指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 22-26.
[4] 范利国, 左锋, 刘吉东, 等. 基于灰色关联度和理想解法的输电网规划综合决策研究[J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(5): 38-43.

[5] 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 775-781.
[6] 周二雄, 李凤婷, 朱贺. 基于改进层次分析法(AHP)的微网成本-效益评估[J]. 电力建设, 2013, 34(3): 1-6.
[7] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用改进细菌觅食算法的风-光-储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25.
[8] N. H., Stavros Papathanassiou, Kai Strunz, et al. A Benchmark Low Voltage Micogrid Network[C]. In: Proceedings of CLGRE Symposium, Athens, Greece 2005: 1-8.
[9] 叶斌. 可靠性效益评估算法以及停电损失费用最小为目标配电网重构[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
[10] 赵豫, 于尔铿. 新型分散式发电装置——微型燃气轮机[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 47-50.

作者简介:

周长特(1983), 男, 学士, 主要从事清洁能源发电规划与设计研究工作。

(收稿日期: 2013-06-26)