

基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估

刘自发¹, 韦涛², 李梦渔¹, 曹志勇¹, 李韦姝¹, 惠慧²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 根据交、直流微电网的特点, 基于供电可靠性、技术经济性以及适应性 3 个准则, 建立了交、直流微电网综合评估指标体系, 并提出各个评价指标的计算模型和量化方法。同时采用 5/5-9/1 标度层次分析法确定各评价指标的权重, 使得确定后的权重更加合理且具有更好的一致性。对交、直流微电网的算例评估结果验证了所提指标体系的合理性以及评估方法的有效性。

关键词: 微电网; 评估; 改进层次分析法; 适应性; 可靠性

中图分类号: TM 61

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.010

0 引言

微电网可在中低压范围内实现分布式发电技术的高效、灵活应用^[1]。现阶段, 微电网供电模式以交流形式为主^[2]。在交流微电网中, 各种微源和储能系统一般通过电力电子变换器接入系统。其中, 光伏电池(PV)、储能系统(ESS)等直流微源通过逆变器接入微电网母线, 微型燃气轮机(MT)、风力发电机(WT)等微源通过变换器接入电网^[3]。随着近年来电子设备的大量应用, 家用电器、商业楼宇、数据中心等直流负荷迅猛增加, 在分布式电源和负荷的推动下, 直接以直流传输线路连接分布式电源和储能装置的直流微电网逐渐成为微电网研究的新方向^[4-5]。

交、直流微电网在组网方式、微源与微电网的接口以及运行控制方式上的不同, 导致其在供电可靠性、经济性等性能上存在差距。如何对交流微电网和直流微电网方案进行全面有效的评估, 帮助决策者做出最优决策, 成为一个亟需研究和解决的问题。目前, 针对交、直流微电网评价方面, 已有的文献主要集中在可靠性或经济性评价。文献[6-8]运用现有配电系统的可靠性指标对微电网可靠性进行了评估。文献[9-10]提出了微电网的综合效益评估模型, 从节能降损、延缓输配网投资等方面分析典型分布式电源和微电网成本效益。文献[11-13]对交、直流系统最大传输容量、损耗和效率等方面进行对比分析, 分析结果认为相对交流系统, 直流双极系统拥有更大的传输容量, 且传输损耗率更低。

本文分别针对交流和直流这 2 种微电网形式, 提出微电网的适应性评价指标, 并结合供电可靠性、技术经济性, 建立评价指标的层次结构体系, 提出基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估方法

模型, 最后通过典型算例分析对该综合评估方法进行验证。

1 交、直流微电网综合评价指标体系

1.1 指标体系构建及原则

构建交、直流微电网综合评价指标体系需要遵循系统、科学、客观和实用等原则。在建立指标体系时, 选取的指标既要尽可能全面地反映评价对象的特性, 又要考虑实际数据采集难度和计算量等问题。此外, 建立交、直流微电网的综合评价指标体系还需要结合微电网自身的特点, 评价指标应同时反映方案属性, 且指标选取的计算量度和计算方法必须一致^[14]。

微电网的供电可靠性指标可以用来度量整个微电网系统及设备按可接受标准及期望数量满足用户电力及电能需求的能力。技术经济效益评估从微电网本身的角度出发评判微电网方案的经济效益, 是衡量微电网建设方案合理性的重要方面。此外, 全面的微电网系统评估应该考虑微电网系统对未来负荷的适应程度。为此, 本文提出了一类新的指标, 即微电网的适应性指标, 其从微电网供电能力、负荷点平均电压和负荷适应度 3 个方面反映交、直流微电网系统负荷特性以及适应负荷发展的程度。

综上所述, 从供电可靠性、技术经济性和适应性 3 个准则出发构建的交、直流微电网综合评估指标体系如图 1 所示。

1.2 单项指标及计算方法

1.2.1 供电可靠性指标

本文采用的供电可靠性指标除常用的系统平均停电频率(SAIFI)指标、系统平均停电时间(SAIDI)指标、平均供电可用率(ASAI)指标外, 还采用了平均孤岛运行持续时间 AIOD(Average Islanding Operation Duration)和孤岛供电不足期望 EDNSI(Expected Demand Not Supplied when being Island)这 2 个指标。

收稿日期: 2015-03-07; 修回日期: 2016-02-22

基金项目: 国家电网公司科技项目

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC

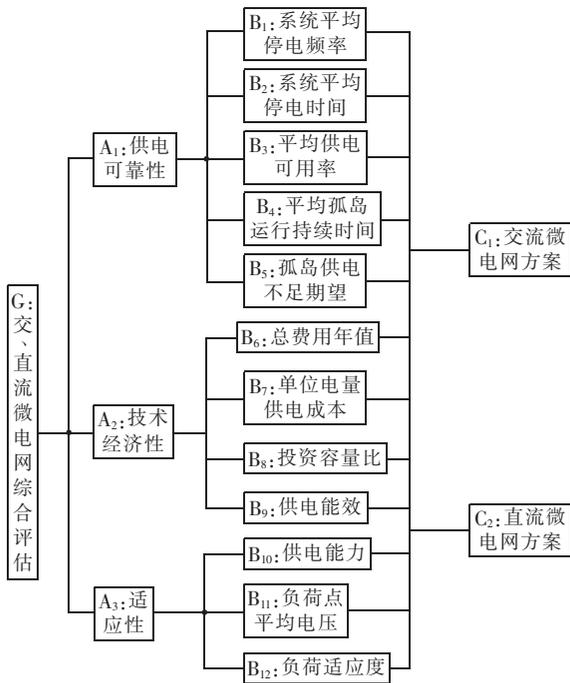


图 1 交、直流微电网综合评估指标体系
Fig.1 Comprehensive evaluation index system of AC and DC microgrid

AIOD 是指由于交流主网或公共连接点故障时微电网孤岛运行持续时间的平均值。由于分布式电源和储能容量限制,孤岛持续时间越长,微电网越容易出现电源不足的情况。AIOD 定义为:

$$t_{AIOD} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} t_i}{N_s} \quad (1)$$

其中, t_i 为每次孤岛运行持续时间; N_s 为孤岛运行次数。

EDNSI 是指微电网孤岛运行时由于电源供电不足需要削减负荷的平均值,用来反映微电网孤岛运行状态下的供电可靠性,其定义为:

$$L_{EDNSI} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} L_i}{N_s} \quad (2)$$

其中, L_i 为每次孤岛运行时削减负荷量。

1.2.2 技术经济性指标

a. 总费用年值 TAC (Total Annual Cost)。

针对各微电网方案,将投资和运行成本费用折算成年费用进行比较。采用工程年费用概念,费用年值计算方法为:

$$C_{TAC} = C_P + C_M + C_B \quad (3)$$

其中, C_P 为投资年值; C_M 为年运行维护费用(含燃料费用); C_B 为年电网购电费用。

投资年值为微电网方案初期总投资折算的年值,计算方法为:

$$C_P = P \frac{\eta_c(1+\eta_c)^{n_w}}{(1+\eta_c)^{n_w} - 1} \quad (4)$$

其中, P 为初期总投资费用; η_c 为折现率; n_w 为运行年限。

b. 单位电量供电成本 PSC (Power Supply Cost per unit)。

单位电量供电成本是指 TAC 与年售电量的比值,计算公式为:

$$C_{ISC} = \frac{C_{TAC}}{E_s} \quad (5)$$

其中, E_s 为年售电量总和。

c. 投资容量比 ICR (Investment Capacity Ratio)。

微电网投资容量比是系统总投资与负荷容量的比值,反映系统单位容量的造价水平,计算公式如式(6)所示。

$$r_{ICR} = \frac{C_{all}}{P_L} \quad (6)$$

其中, C_{all} 为微电网系统的总投资; P_L 为负荷容量。

d. 供电能效 PSE (Power Supply Efficiency)。

微电网系统的电能损耗主要包括换流器损耗和线路损耗 2 个方面。定义微电网供电能效指标如式(7)所示。

$$\lambda_{PSE} = \frac{P_L}{P_{in}} \quad (7)$$

其中, P_{in} 为微电网中电源供给功率。

1.2.3 适应性指标

a. 供电能力 PSC (Power Supply Capacity)。

供电能力反映的是微电网系统在满足安全性和可靠性要求时,线路可以送达的负载量和距离。在电压降落约束条件下,交流线路供电能力计算公式为:

$$S_{PSC}^{AC} = Pl = \frac{U_N \Delta U}{r_0 + x_0 \tan \varphi} \quad (8)$$

其中, φ 为线路功率因数角。

直流双极线路供电能力计算公式为:

$$S_{PSC}^{DC} = Pl = \frac{2U_N \Delta U}{r_0} \quad (9)$$

其中, P 和 l 分别为线路输送功率和线路长度; U_N 为线路额定电压; r_0 和 x_0 分别为线路单位长度电阻和电抗。

b. 负荷点平均电压 LAV (Load Average Voltage)。

负荷点平均电压指每个负荷点电压平均值,计算公式为:

$$U_{LAV} = \frac{\sum_{i=1}^N U_i}{N} \quad (10)$$

其中, U_i 为微电网中各负荷点的电压值(标么值); N 为负荷点总数量。

c. 负荷适应度 LFD (Load Fitness capability Degree)。

负荷适应度反映的是系统中更适合交流或直流形式供电的负荷比例。根据用户能耗构成可以将用

户负荷分为 3 类:第一类为纯阻性负荷,可以直接在交流和直流电源下工作;第二类为感应型旋转电机类负荷,接入交流电源工作;第三类为电子类设备以及变频电器,适用于直流供电。

对于交流系统,负荷适应度为:

$$D_{\text{LFR}}^{\text{AC}} = \frac{P_1 + P_2}{P_L} \quad (11)$$

对直流系统,负荷适应度为:

$$D_{\text{LFR}}^{\text{DC}} = \frac{P_2 + P_3}{P_L} \quad (12)$$

其中, P_1 、 P_2 和 P_3 分别为系统中第一类、第二类、第三类负荷的容量。

2 基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评估方法

2.1 5/5-9/1 标度层次分析法

微电网方案评估的过程中,各指标的地位和作用是不同的,且各个指标的重要性随着具体情况的差异而不同。本文在分析交、直流微电网供电可靠性、技术经济性和适应性的基础上,采用改进层次分析法建立清晰的层次结构来分解复杂问题,能够有效处理各项评估指标之间的内在联系及相互独立性^[15]。改进层次分析法通过量化方案各项属性,逐层建立判断矩阵,然后求解各层属性相对上层属性的权重,最后计算方案的综合权重,完成对方案的综合评估。

相对层次分析法存在的主观性较强、一致性不足等问题,本文采用的改进层次分析法主要有以下 2 点改进。

(1) 用 5/5-9/1 标度法取代 1-9 标度法,提高所求得的权重值的合理性。

根据 5/5-9/1 标度法的原理,其对于 1-9 标度法的改进标度模型为:

$$S(k) = \frac{k}{10-k} \quad (13)$$

设 2 个指标分别为 α_i 和 α_j 。

a. 当 α_i 相比 α_j 的重要性为相同、较强、强、很强、绝对强时, k 分别取 5、6、7、8、9; α_i 相比 α_j 的重要程度介于上述标度之间时, k 分别取 5.5、6.5、7.5、8.5。

b. 当 α_j 相比 α_i 的重要性为相同、较强、强、很强、绝对强时, k 分别取 5、4、3、2、1; α_j 相比 α_i 的重要程度介于上述标度之间时, k 分别取 4.5、3.5、2.5、1.5。

下面用 1 个算例来验证。

建立 1-9 标度矩阵 A 和 5/5-9/1 标度矩阵 B :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & 6/4 \\ 4/6 & 1 \end{bmatrix}$$

求得矩阵 A 和 B 的权重分别为:

$$w_A = (0.75, 0.25), \quad w_B = (0.6, 0.4)$$

从得出的权重可以看出,显然 5/5-9/1 标度矩阵得出的权重比 1-9 标度矩阵更符合判断矩阵所表述的重要程度,因此可验证 5/5-9/1 标度矩阵得出的权重相对更合理。

(2) 提出适用于 5/5-9/1 比例标度不一致性矩阵的修正方法,改进 5/5-9/1 标度矩阵的不一致性,具体如式(14)所示。

$$\Delta\sigma_{ij} = a_{ij} \frac{w_j'}{w_i'} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

其中, a_{ij} 为判断矩阵中元素, $\Delta\sigma_{ij}$ 为其扰动变量; w_i' 、 w_j' 分别为第 i 、 j 个指标权重。

根据式(14)计算矩阵中各元素的扰动变量,并搜索出其中的最大扰动变量 $\Delta\sigma_{ij\max}$,通过以下方法修正最大扰动变量对应的元素。

a. 假设最大干扰变量对应的元素为 a_{mn} ,标度为 $k/(10-k)$,则将 a_{mn} 修改为 $(k-0.5)/[10-(k-0.5)]$,并同时修改 a_{nm} 为 $[10-(k-0.5)]/(k-0.5)$;然后再校验新矩阵的一致性,如满足一致性要求则完成修正;如不满足一致性要求,不需要重新对新矩阵计算每对元素的干扰变量组,只需更改原矩阵中大小排在第 2 位的干扰变量组即可。依此类推直到满足一致性要求为止。

b. 当干扰变量对应的元素 $a_{mn}=1/9$,即此元素无法按照 **a** 中的方法进行修改时,则保留此元素以及对应元素 a_{nm} 的值,按照 **a** 中的方法修改大小排在第 2 位的干扰变量所对应的元素组 $\{a_{st}, a_{ts}\}$,然后按 **a** 中方法进行修正即可。

例如矩阵 A_1 为一个 4×4 的 5/5-9/1 标度矩阵:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5.5/4.5 & 7/3 & 8.5/1.5 \\ 4.5/5.5 & 1 & 6/4 & 6/4 \\ 3/7 & 4/6 & 1 & 6.5/3.5 \\ 1.5/8.5 & 4/6 & 3.5/6.5 & 1 \end{bmatrix}$$

对矩阵 A_1 进行一致性校验可得,其检验系数 $CR=0.146$,大于 0.1,不符合一致性校验要求,需要对矩阵进行修正。按前述介绍的 5/5-9/1 标度矩阵的修正方法进行修正后所得的矩阵为:

$$A_1' = \begin{bmatrix} 1 & 5.5/4.5 & 7/3 & 8.5/1.5 \\ 4.5/5.5 & 1 & 6/4 & 6.5/3.5 \\ 3/7 & 4/6 & 1 & 6.5/3.5 \\ 1.5/8.5 & 3.5/6.5 & 3.5/6.5 & 1 \end{bmatrix}$$

对矩阵 A_1' 进行一致性校验可得,其检验系数 CR 为 0.0923,小于 0.1,符合一致性校验要求,修正成功。

2.2 基于 5/5-9/1 标度层次分析法的交、直流微电网综合评估

运用改进层次分析法对交、直流微电网方案进

行综合评估,主要步骤如下。

a. 根据不同层次指标的相互关系确立综合评估的层次模型。

b. 由单项指标计算方法对方案属性进行计算,并对计算值进行无量纲化处理得到指标的评价值;本文采用功效系数法^[14]对评价指标作无量纲化处理,计算方法为:

$$x_{ij}^* = c + \frac{x_{ij} - m_j'}{M_j' - m_j'} d \quad (15)$$

其中, x_{ij} 、 x_{ij}^* 分别为方案 i 指标 x_j 的计算值和评价值; M_j' 、 m_j' 分别为指标 x_j 的满意值和不容许值; c 、 d 均为正常数,通常取 $c=60$ 、 $d=40$ 。

c. 对本层次各元素相对重要程度进行定量分析,采用 5/5-9/1 标度法形成判断矩阵,得到更合理的权重。

d. 根据所形成的 5/5-9/1 比例判断矩阵,对其进行一致性校验,如符合一致性校验标准则进行步骤 e; 如不符合一致性校验标准,则需要对判断矩阵进行修正。

e. 完成一致性校验后,根据判断矩阵,计算最大特征值 λ_{\max} 及其对应特征向量 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$, 归一化得到该层各个评价指标关于上一层指标的相对权重 $\mathbf{W}' = [w'_1, w'_2, \dots, w'_n]$ 。

f. 利用各层单排序的结果,计算出指标层对目标层的综合权重 ω_i , 基于改进层次分析法的交流微电网综合评估结果 S 为:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \omega_i \quad (16)$$

其中, n 为方案属性个数; S_i 为第 i 个指标的评价值;

ω_i 为第 i 个指标的权重。

3 算例分析

本文对 Benchmark 低压微电网系统^[6]进行分析,该微电网通过公共连接点(PCC)与 10 kV 交流主网相连,系统中负荷由风机、光伏、微型燃气轮机组和燃料电池(FC)等多种分布式电源以及交流主网供电,在系统孤岛运行以及负荷高峰时储能装置切入系统承担部分负荷,维持微电网稳定运行。微电网中分布式电源安装容量总计为 93 kW,储能安装容量为 30 kW,负荷容量为 116.4 kW。本文在微源、储能和负荷配置基础上,分别给出交、直流微电网方案见图 2。

交流微电网方案:交流微电网通过变压器与交流 10 kV 主网相连,系统中风电机组、微型燃气轮机均以 AC-DC-AC 接口形式接入 0.4 kV 交流微电网,光伏发电单元和燃料电池则通过逆变器并入微电网,蓄电池储能通过双向 AC-DC 环节接入系统中,系统中交流负荷直接或经过 AC-DC-AC 环节,直流负荷经过整流环节接入微电网,如图 2(a)所示。

直流微电网方案:直流微电网采用直流双极形式,通过电压型 PWM 整流器、整流变压器与交流主网相连,系统中风电机组、微型燃气轮机机组通过电压型 PWM 整流器并入微电网,光伏发电单元和燃料电池单元则通过 DC-DC 变换器接入系统中,蓄电池储能通过双向 DC-DC 并入微电网,系统中交流负荷经电压型逆变器,直流负荷直接或经过 DC-DC 变换接入微电网,如图 2(b)所示。

微电网系统风电装机容量为 10 kW,光伏装机

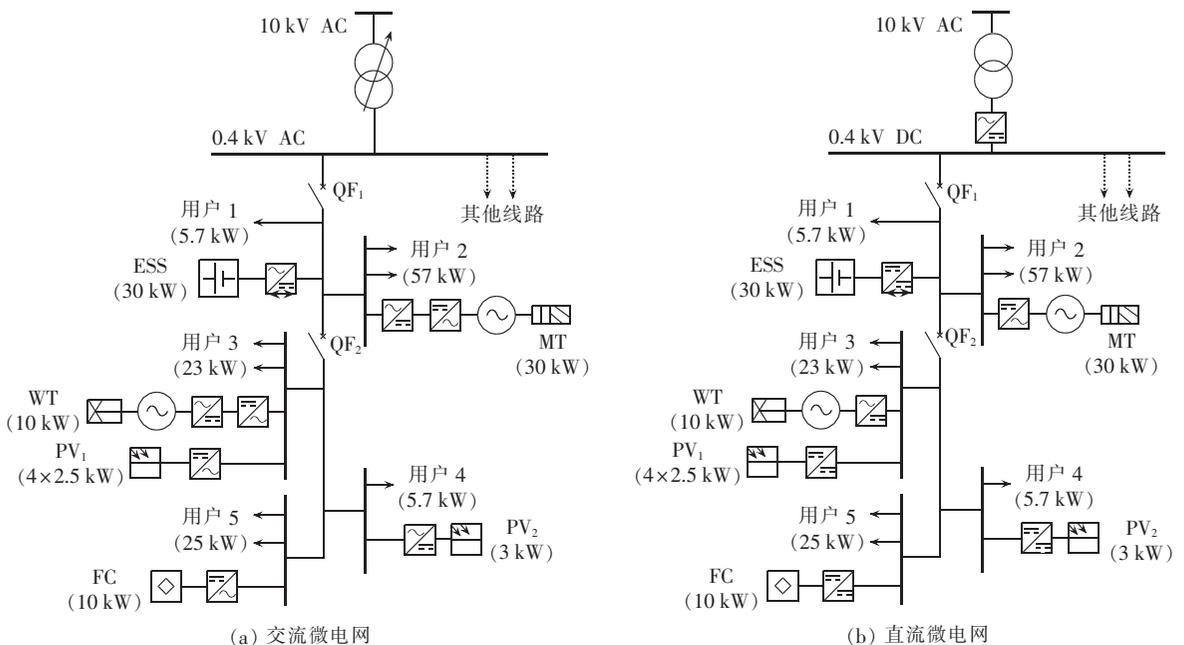


图 2 交流微电网与直流微电网结构图
Fig.2 Structure of AC microgrid and DC microgrid

容量为 13 kW, 燃料电池容量为 10 kW, 储能电池容量为 30 kW, 系统最大负荷为 118 kW。本文采用序贯蒙特卡洛法计算微电网可靠性指标。微电网中主要设备的可靠性参数如表 1 所示。

表 1 主要元件的可靠性参数

Table 1 Reliability parameters of main components

元件	失效率/ (次·a ⁻¹)	修复 时间/h	元件	失效率/ (次·a ⁻¹)	修复 时间/h
PV	0.110	72	逆变器	0.167	18
WT	0.210	60	斩波器	0.272	18
FC	0.110	72	变压器	0.012	110
MT	0.160	16	交流断路器	0.080	18
ESS	0.220	60	直流断路器	0.300	30
PCC	2.880	1.34	线路	0.160	8
整流器	0.146	18	直流线路	0.160	8

微电网投资主要由一次设备和配套的二次设备投资构成。而系统的维护成本、燃料费用以及从电网购电费用则与微电网中电源的出力及负荷率有关。表 2 给出系统中分布式电源年最大利用小时数 T_{\max} 。

表 2 分布式电源及负荷的年最大利用小时数

Table 2 Maximum annual utilization hours of DG and load

类型	T_{\max}/h	类型	T_{\max}/h
MT	4865	FC	7716
WT	1672	负荷	4278
PV	2245		

计算微电网供电能力时, 采用 4 mm×120 mm 铝导线, 电压降落约束 ΔU 取 7% U_N , 由式(8)、(9)计算可得交流微电网 $S_{PSC}^{AC}=34.54 \text{ kW}\cdot\text{km}$, 直流微电网 $S_{PSC}^{DC}=78.87 \text{ kW}\cdot\text{km}$ 。

通过计算, 在分布式电源额定最大功率及满负荷运行状态下, 交、直流微电网系统中各部分损耗如表 3 所示。

表 3 交、直流微电网损耗

Table 3 Loss of AC/DC microgrid

微电网	损耗/kW			总计
	线路	分布式电源换流器	主网换流器	
交流微电网	0.971	8.984	1.728	11.683
直流微电网	0.370	6.105	3.850	10.325

根据表 3, 由式(7)计算得交流微电网供电能效为 90.88%, 直流微电网供电能效为 91.85%。

根据电压损耗计算公式, 得到的各用户点电压值(标幺值)如表 4 所示。

根据微电网中纯阻性负荷、交流负荷及直流负荷比例可求出微电网系统的负荷适应度, 交、直流微电网负荷适应度的计算结果分别为 68.6%、47.4%。

运用本文提出的方法, 对各层指标权重值进行

表 4 负荷点平均电压值
Table 4 Average load voltages

用户点	交流供电时电压	直流供电时电压
1	0.9997	0.9998
2	0.9951	0.9987
3	0.9946	0.9985
4	0.9943	0.9984
5	0.9938	0.9981
平均值	0.9955	0.9987

求解。以准则层各指标为例, 分析准则层供电可靠性、技术经济性和适应性 3 个指标的两两重要程度, 确定目标层对准则层的判断矩阵为:

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 6/4 & 5.5/4.5 \\ 4/6 & 1 & 4.5/5.5 \\ 4.5/5.5 & 5.5/4.5 & 1 \end{bmatrix}$$

检验系数 $CR=0.000011 < 0.1$, 判断矩阵通过一致性检验。计算目标层对准则层的层次权重为 $\omega_{G1}=[0.4025 \ 0.2687 \ 0.3288]$ 。同理, 利用该方法计算准则层对指标层的层次权重, 并最终得到指标层对目标层的综合权向量为:

$$\omega = [0.0676, 0.0676, 0.1586, 0.0588, 0.0499, 0.0886, 0.0560, 0.0761, 0.0480, 0.0883, 0.1323, 0.1081]$$

根据所计算出的指标层对目标层的综合权重, 利用式(16)计算得出的微电网方案属性决策表如表 5 所示。

表 5 数据为在目前的水平下, 交、直流微电网可靠性、经济性以及适应性的评分情况以及总体评分情况。值得指出的是, 微电网技术正在快速发展时期, 不仅需要评估目前的交、直流微电网, 而且要对未来交、直流微电网总体情况进行评估。

根据文献[17-19]的换流器、逆变器和斩波器的可靠性参数基础数据, 分析其趋势曲线来预测 2020 年和 2025 年的可靠性参数, 结果如图 3 所示。同理可得出元件经济性趋势曲线^[20]和负荷适应度趋势曲线^[13]分别如图 4、图 5 所示。

根据前述的改进层次分析法权重计算方法以及各个指标的计算模型, 利用式(16)计算得出 2020 年、2025 年的微电网方案属性决策结果如表 6 所示。

以上计算结果表明: 在当前的技术条件下, 交流微电网的可靠性要明显优于直流微电网, 原因之一在于换流器、逆变器和斩波器等直流微电网中常用的电力电子设备故障率较高; 原因之二是由于微电网内各电源不能完全满足负荷需求, 因此一旦公共连接点出现故障, 微电网孤岛运行时极有可能因电源不足而损失部分负荷。在技术经济性方面, 除了供电能效指标外, 目前交流微电网的其他指标也优

表 5 方案属性决策表
Table 5 Attribute decision table of AC/DC microgrid scheme

准则层	指标层	方案指标计算值		方案指标评分值		方案准则评分值	
		交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网
供电可靠性	系统平均停电次数/(次·a ⁻¹)	1.02	1.57	85.83	78.19		
	系统平均停电时间/(h·a ⁻¹)	3.43	6.04	77.63	60.60		
	平均供电可用率/%	99.961	99.931	77.71	60.57	81.05	69.81
	AIOD/h	4.71	5.06	89.16	87.76		
	EDNSL/kW	28.06	29.59	80.25	79.18		
技术经济性	总费用年值/元	297603	308126	84.09	81.28		
	单位电量供电成本/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.58764	0.61884	85.43	81.27	83.20	81.61
	投资容量比/(元·kW ⁻¹)	14837	16001	89.60	88.23		
	供电能效/%	90.88	91.85	68.82	72.14		
适应性	供电能力/(kW·km)	34.54	78.87	77.52	100.00		
	负荷点平均电压	0.9955	0.9987	96.40	98.96	88.38	92.66
	负荷适应度/%	68.6	47.4	87.44	78.96		
总评分						84.04	80.50

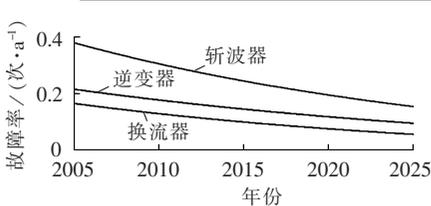


图 3 电力电子元件故障率趋势曲线

Fig.3 Trend curve of failure rate for power electronic components

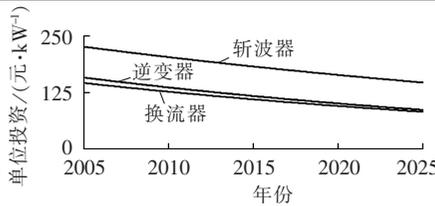


图 4 电力电子元件单位投资曲线

Fig.4 Curve of unit investment for power electronic components

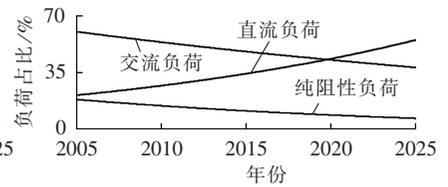


图 5 负荷占比趋势曲线

Fig.5 Trend curve of load ratio

表 6 2020 年和 2025 年交、直流微电网方案属性决策表
Table 6 Attribute decision table of AC/DC microgrid scheme for 2020 and 2025

准则层	指标层	2020 年方案		2020 年方案		2020 年方案		2025 年方案		2025 年方案		2025 年方案		
		交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	交流微电网	直流微电网	
供电可靠性	系统平均停电次数/(次·a ⁻¹)	0.99	1.26	86.25	82.50			0.93	1.04	87.08	85.56			
	系统平均停电时间/(h·a ⁻¹)	2.80	4.64	82.03	70.21	83.67	75.91	2.28	3.15	85.36	79.78	86.03	82.06	
	平均供电可用率/%	99.968	99.947	81.71	69.71			99.974	99.964	85.14	79.43			
	AIOD/h	4.49	4.95	90.04	88.20			4.15	4.75	91.40	89.00			
	EDNSL/kW	26.86	28.52	81.10	79.93			25.54	27.6	82.03	80.58			
技术经济性	总费用年值/元	291167	300931	85.82	83.20			286523	295256	87.06	84.72			
	单位电量供电成本/[元·(kW·h) ⁻¹]	0.53031	0.55620	93.11	90.45	84.87	84.57	0.49828	0.51338	97.34	95.33	85.56	86.71	
	投资容量比/(元·kW ⁻¹)	14783	15933	89.67	88.31			14741	15890	89.72	88.36			
	供电能效/%	90.04	92.76	65.95	75.25			89.02	93.48	62.46	77.71			
适应性	供电能力/(kW·km)	34.54	78.87	77.52	100.00			34.54	78.87	77.52	100.00			
	负荷点平均电压	0.9955	0.9987	96.40	98.96	86.45	93.81	0.9955	0.9987	96.40	98.96	85.50	94.56	
	负荷适应度/%	53.90	56.10	81.56	82.44			46.70	61.80	78.68	84.72			
总评分						84.90	84.12	85.73						87.42

于直流微电网,原因在于现阶段交流配电设备造价更低,降低了微电网初期投资费用和维护费用,因此交流微电网成本要低于直流微电网。而在适应性方面,直流微电网较交流微电网有明显优势,在采用相同截面导线情况下,直流双极系统传输容量大,系统供电能效高。

通过对 2020 年和 2025 年交、直流微电网供电方案的评估结果可见,随着电力电子技术的发展,换流器、逆变器及斩波器的可靠性得到提高,使得直流

微电网的整体可靠性水平大幅提升,但其水平仍低于交流微电网;在经济性方面,直流微电网的经济性有较大提升,2020 年及以后,交、直流微电网经济性大体相当;在适应性方面,直流负荷在未来占据较大的比例,使直流微电网的负荷适应度提高,并且优势明显。由上述计算和分析可见,随着电力电子设备可靠性以及经济性的改善,直流微电网相对于交流微电网的整体趋势为由相对较弱到大体相当,最后变为相对较优。

4 结论

本文提出基于改进层次分析法的交、直流微电网综合评价指标体系和综合评估方法,并利用该方法分析交、直流微电网算例,通过分析得到以下结论:

a. 对层次分析法进行改进,并基于改进后的层次分析法建立交、直流微电网综合评估方法,改进后的方法求解的指标权重更加合理,判断矩阵的一致性得到了改善;

b. 通过算例验证本文提出的交、直流微电网综合评价指标体系和综合评估方法,证明了该指标体系和方法能够有效地评估交、直流微电网方案;

c. 通过对交、直流微电网算例进行评估,结果表明在目前的技术条件下,交流微电网整体上相对于直流微电网有一定的优势,但随着技术发展、成本降低以及负荷类型的变化,直流微电网有很大的发展潜力,在未来能够显现出相对于交流微电网的优势。

参考文献:

- [1] 王成山,李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):10-14.
WANG Chengshan,LI Peng. Development and challenges of distributed generation,the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):10-14.
- [2] BARNES M. Real-world microgrid-an overview[C]//IEEE International Conference on System of Systems Engineering. San Antonio,USA:IEEE,2007:1-8.
- [3] 王毅,张丽荣,李和明. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):16-24.
WANG Yi,ZHANG Lirong,LI Heming. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(4):16-24.
- [4] JUSTO J J,FRANCIS M,LEE J. AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources:a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2013,24(10):387-405.
- [5] 吴卫民,何远彬,耿攀. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-104.
WU Weimin,HE Yuanbin,GENG Pan. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(1):98-104.
- [6] 罗奕,王钢,汪隆君. 微网可靠性评估指标研究[J]. 电力系统自动化,2013,37(5):9-13.
LUO Yi,WANG Gang,WANG Longjun. Reliability evaluation indices for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(5):9-13.
- [7] DIALYNAS E N,DAOUTIS L. Modelling and evaluation of microgrids reliability and operational performance and its impact on service quality[J]. European Transactions on Electrical Power,2011,21(2):1255-1270.
- [8] WANG S,LI Z,WU L,et al. New metrics for assessing the reliability and economics of microgrids in distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):2852-2861.
- [9] 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.
LIANG Huishi,CHENG Lin,SU Jian. Cost benefit analysis for microgrid[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(Supplement):38-44.
- [10] 杨佩佩. 微网的经济运行分析与研究[D]. 北京:华北电力大学,2009.
YANG Peipei. Economic operation analysis and study of microgrid[D]. Beijing:North China Electric Power University,2009.
- [11] STARKE M R,LI F,TOLBERT L M,et al. AC vs. DC distribution:maximum transfer capability[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century,2008. [S.l.]:IEEE:2008:1-6.
- [12] STARKE M R,TOLBERT L M,OZPINECI B. AC vs. DC distribution:a loss comparison[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Pittsburgh,PA,USA:IEEE/PES,2008:1-7.
- [13] DASTGEER F,KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation[C]//Power Engineering Conference, AUPEC. Adelaide,SA, Australia:IEEE,2009:1-5.
- [14] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社,2007:5-74.
- [15] 李晓辉,张来. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2008,36(14):57-61.
LI Xiaohui,ZHANG Lai. The research on the evaluation system for existing network based on analytic hierarchy process and Delphi method[J]. Power System Protection and Control,2008,36(14):57-61.
- [16] PAPATHANASSIOU S,HATZIARGYRIOU N,STRUNZ K. A benchmark low voltage microgrid network[C]//Proceedings of the CIGRE Symposium:Power Systems with Dispersed Generation. [S.l.]:CIGRE,2005:1-8.
- [17] Department of Defense. Military handbook,reliability prediction of electronic equipment: MIL-HDBK-217F[S]. Washington DC, USA:[s.n.],1991.
- [18] EICHER S,RAHIMO M,TSYPLAKOV E,et al. 4.5 kV press pack IGBT designed for ruggedness and reliability[C]//Industry Applications Conference,2004,39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE. Seattle,USA:IEEE,2004:1534-1539.
- [19] ARIFUJJAMAN M,CHANG Liuchen. Reliability comparison of power electronic converters used in grid-connected wind energy conversion system[C]//2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Aalborg,Danmark:IEEE,2012:323-329.
- [20] ABB. ABB 变频器价格[EB/OL]. [2015-01-07]. <http://www.automation.com.cn/subjectActivities4.html>.

作者简介:



刘自发

刘自发(1973—),男,黑龙江牡丹江人,副教授,博士,主要研究领域为直流微电网、直流配网以及分布式电源接入电网分析(E-mail:tjubluesky@163.com);

韦涛(1976—),男,甘肃兰州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为城市电网规划;

李梦渔(1986—),男,河南郑州人,硕士研究生,研究方向为直流配网、微电网评估(E-mail:limengyu86@163.com);

曹志勇(1990—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为直流微电网运行与控制(E-mail:zhiyongcao@163.com)。

(下转第78页 continued on page 78)

- demand in systems with significant installed wind capacity[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 22(2): 587-594.
- [15] 赵书强, 刘晨亮. 基于机会约束的储能日前优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3055-3059.
- ZHAO Shuqiang, LIU Chenliang. Chance-constrained programming based day-ahead optimal scheduling of energy storage[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3055-3059.
- [16] 雷秀娟. 群智能优化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 127-129.
- [17] 于佳. 基于机会约束规划的风-蓄联合动态调度[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2116-2122.
- YU Jia. A chance-constrained programming based dynamic economic dispatch of wind farm and pumped-storage power station[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2116-2122.
- [18] 陈达威. 微电网中负荷优化分配技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.

- CHEN Dawei. Study of optimal load distribution of microgrids [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [19] WANG M Q, GOOI H B. Spinning reserve estimation in microgrids [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1164-1174.

作者简介:



任建文

任建文(1961—),男,山西吕梁人,教授,博士,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等(E-mail: rjw219@126.com);

渠卫东(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail: qwdgeg@163.com)。

Dynamic economic dispatch based on chance-constrained programming for islanded microgrid

REN Jianwen, QU Weidong

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The uncertainty factors, such as renewable power generation fluctuation and incorrect forecasted load, bring difficulty to the economic dispatch of islanded microgrid. A dynamic economic dispatch model based on chance-constrained programming is proposed for islanded microgrid, which adopts the scheduled power outputs of generation units and energy storage unit and the generation-side and load-side managements of renewable power. It represents the wind/photovoltaic power outputs and load forecasting error as random variables and the confidence level of satisfying the spinning reserve as the power-supply reliability of microgrid. The chance constraints are converted into their certain equivalent classes to derive the mathematical expression of expected load loss. A modified particle swarm optimization algorithm is applied to solve the model. Results of case analysis verify the rationality of the proposed model.

Key words: microgrid; islanding mode; dynamic economic dispatch; chance-constrained programming; particle swarm optimization algorithm; electric load forecasting; errors

(上接第 66 页 continued from page 66)

Comprehensive evaluation based on improved analytic hierarchy process for AC/DC microgrid

LIU Zifa¹, WEI Tao², LI Mengyu¹, CAO Zhiyong¹, LI Weishu¹, HUI Hui²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: According to the features of AC/DC microgrid, a comprehensive evaluation index system is established based on three criteria: power-supply reliability, technical economy and adaptability, while a calculation model and a quantification method are proposed for each index. The 5/5-9/1 scale analytic hierarchy analysis is applied to determine the weight of each index and the determined weights are more reasonable and coherent. The evaluation results of an AC/DC microgrid demonstrate the rationality of the proposed index system and the effectiveness of the proposed method.

Key words: microgrid; evaluation; improved analytic hierarchy process; adaptability; reliability