

# 基于多源数据的主动配电网运行评估指标与方法研究

陈旻<sup>1</sup>, 刘竹杰<sup>1</sup>, 李美依<sup>2</sup>, 胡翼<sup>1</sup>, 李家睿<sup>1</sup>, 袁鑫<sup>1</sup>  
(1. 国网上海松江供电公司, 上海 200000, 2 上海交通大学, 上海 200240)

**摘要:** 为解决主动配电网分布式电源含量高、运行数据多样、运行状态复杂且难以评估的问题, 本文基于分布式电源、配电网络与控制设备的特点, 分别建立了主动配电网分布式电源层、网络层与主动控制层的各层动态指标体系; 基于模糊评估算法, 建立了包含各层级动态指标的主动配电网运行感知指标体系。采用 IEEE34 节点配网模型的拓扑与运行信息作为算例进行研究, 输出结果为各馈线评估结果以及由该四条馈线组成的主动配电网区域的整体评估结果。根据评估等级(恶化, 危险, 脆弱, 正常, 良好), 可以初步评估当前主动配电网的运行状态, 并为进一步的状态检测提供指导建议。

**关键词:** 主动配电网; 多源数据; 电网评估; 模糊评估; 感知指标

[中图分类号]TM769[文献标识码]X[文章编号]

## Evaluation Index and Method of Active Distribution Network Based on Multi-source Data

Yang Chen<sup>1</sup>, Zhujiu Liu<sup>1</sup>, Meiyi Li<sup>2</sup>, Yi Hu<sup>1</sup>, Jiarui Li<sup>1</sup>, Xin Yuan<sup>1</sup>  
(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, China, Shanghai 200000, 2. Shanghai Jiao Tong University, China, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of high penetration of distributed generations, diverse operation data, complex operation state and the difficulty of evaluating in active distribution network, a dynamic index systems of distributed generators layer, network layer and active control layer of active distribution network are established according to the characteristics of distributed generators, distribution network and control equipment respectively. Based on the fuzzy evaluation algorithm, the dynamic index systems including all levels of actions of each layer are established. The IEEE 34-node distribution network model are taken as an example to verify the evaluation method. According to the assessment level, the operation status of active distribution network can be assessed.

**Keywords:** Active Distribution Network; Multi-source Data; Evaluation; Fuzzy; Perception Index

## 0 引言

大规模分布式电源的接入增加了配电网的复杂性<sup>[1-2]</sup>, 以高电能品质、高运行可靠性以及清洁能源的高渗透率为目标主动配电网得到了应用推广<sup>[3-4]</sup>。主动配电网运行感知是其可靠、安全运行的重要基础, 而构建主动配电网运行状态的动态指标评估体系是主动配电网运行感知的关键技术环节<sup>[5]</sup>。由于分布式电源接入对传统配电网电压波动有较大影响, 且其输出谐波可能影响主动配电网实时运行状态评估<sup>[6-7]</sup>。模糊评估算法具有较强的容错性, 能够检测并剔除坏数据<sup>[8]</sup>, 是实现主动配电网运行感知的基础。

对基于主动配电网的运行感知主要需从分布式电源层、网络层与主动控制层等多个层级着手, 但目前还未有完备的主动配电网运行感知评价体系。文献[9]从经济性、可靠性及安全性三个角度构建了配网实时运行态势综合评估指标体系; 文献[10]构建的配网经济运行评价指标体系有利于实现对配网运行经济性评估。文献[11-12]面向主动配电网建立了多目标优化运行模型及动态调度优先级评估体系。上述论文从多个角度、运用多种方法构建了配网运行评估指标体系等, 但皆缺乏对主动配电网领域的多源数据考量。

本文建立了主动配电网分布式电源层、网络层与主动控制层的各层动态指标体系。运用模糊评估算法建立了包含各层级动态指标的主动配电网运行感知指标体系。采用 IEEE 34 节点配网模型的拓扑与运行信息作为算例进行研究，验证所提运行感知方法的有效性。

## 1 主动配电网多层动态指标体系

主动配电网多层动态指标类包含分布式电源层、网络层、控制层等多种动态指标类，图 1 为其具体构成。

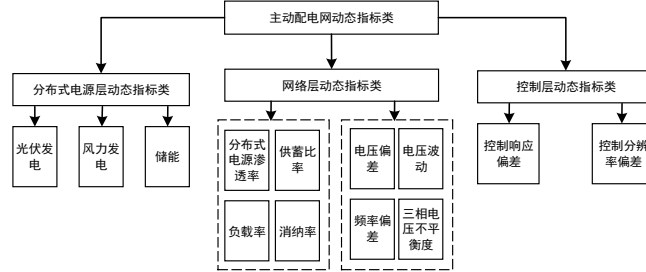


图 1 主动配电网多层动态指标类

### 1.1 分布式电源层动态指标类

#### 1.1.1 设备健康状态评估

采用量化的形式对各设备进行状态评估<sup>[13]</sup>，各部件权重值用层次分析法计算得出。第  $i$  个部件的最后得分  $M_i$  为：

$$M_i = m_i K_F (100 - 0.5 NY) / 100 \quad (1)$$

$$m_i = 100 - \max_{u=1, \dots, u_{\max}} \{Dgr\} \quad (2)$$

式中  $m_i$  为  $i$  部件基础得分； $K_F$  为家族缺陷系数，对存在家族缺陷的部件  $K_F = 0.95$ ，无缺陷的  $K_F = 1$ ； $K_F$  为寿命系数。 $Dgr$  为相应部件各状态量扣分值。 $NY$  为运行年数。

计算采用模糊神经网络算法<sup>[14]</sup>结构，包括 5 层前件网络和 3 层后件。前件网络第一层为输入层，其中第  $i$  个输入  $I_i^{(1)}$  和输出  $O_i^{(1)}$  如式 (3) 所示，节点个数为  $nx$ 。

$$O_i^{(1)} = I_i^{(1)}, i = 1, 2, \dots, nx \quad (3)$$

第二层计算不同输入分量隶属度函数  $M_{j,i}(x_i)$ ，输入  $I_{i,j}^{(2)}$  和输出  $O_{i,j}^{(2)}$  如式 (4)，各输入分量的模糊分割数为  $k_1$ ，共有  $nxk_1$  个节点。

$$O_{i,j}^{(2)} = \exp(I_{i,j}^{(2)}) = \exp[M_{j,i}(O_i^{(1)})] = \exp[(O_i^{(1)} - c_{i,j})^2 / \sigma_{i,j}^2], i = 1, \dots, nx, j = 1, \dots, k_1 \quad (4)$$

第三层计算适应度值，共有  $k_2$  个节点，其输出  $O_m^{(3)}$  为：

$$O_m^{(3)} = \beta_m = O_{1,j_1}^{(2)} \wedge O_{2,j_2}^{(2)} \wedge \dots \wedge O_{nx,j_{nx}}^{(2)}, j_1, \dots, j_{nx} = 1, \dots, k_1, m = 1, \dots, k_2 \quad (5)$$

第四层进行归一化处理，其输出  $O_m^{(4)}$  为：

$$O_m^{(4)} = \beta_m = O_m^{(3)} / \sum_{m=1}^{k_2} O_m^{(3)}, m = 1, \dots, k_2 \quad (6)$$

前件网络的第五层就是后件网络的第三层，是对非线性系统的无限逼近，令  $y_m(k) = \omega_{m,0}x_0 + \omega_{m,1}x_1 + \dots + \omega_{m,nx}x_{nx}$ ，第五层的输入输出为：

$$O^{(5)} = I^{(5)} = \sum_{m=1}^{k_2} \beta_m y_m(k) \quad (7)$$

前件网络第二层中隶属度中心  $c_{i,j}$  和宽度  $\sigma_{i,j}$  以及后件网络中权值  $\omega_{m,i}$  都是未知量，需采用自适应遗传禁忌算法计算。计算中，染色体编码将  $c_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$  和  $\omega_{m,i}$  实数编码，长度为  $c_{i,j}$ 、 $\sigma_{i,j}$  和  $\omega_{m,i}$  个数和。编码方式为：

$$[c_{1,1}, \dots, c_{nx,k_1}, \sigma_{1,1}, \dots, \sigma_{nx,k_1}, \omega_{1,1}, \dots, \omega_{k_2,nx}] \quad (8)$$

至此,可根据分布式能源监测装置采集设备电压、电流和环境温度作为模糊神经网络的算法输入判断设备健康指数, 流程为:

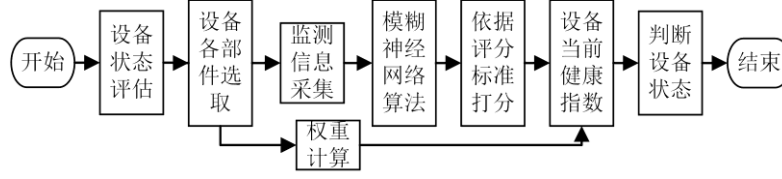


图 2 分布式电源设备状态评估流程图

### 1.1.2 分布式电源出力波动性评估

波动性指标为:

$$R_{Fres} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \{P_{res}((i+1)\Delta T) - P_{res}(i\Delta T)\}^2 / n / P_{res}^*} \quad (9)$$

式中  $\Delta T$  为基准时间间隔;  $i$  为基准时间间隔数;  $P_{res}$  和  $P_{res}^*$  为间歇式能源出力及其平均值。

### 1.2 网络层动态指标类

配电网健康状态含间歇式能源渗透率  $\lambda_{jt}$ 、储蓄比率  $R_{ss}$ 、消纳率  $\theta$  和负载率  $\theta_1$  四个柔性指标和电压偏差  $\Delta U$ 、电压波动  $U_t$  %、频率偏差  $\Delta f$  和电压合格率  $K_{zu}$  % 四个硬性指标:

表 1 网络层动态指标

间歇式能源渗透率	$\lambda_{jt} = \sum P_{res}^* / P_L^{\max}$	电压偏差	$\Delta U = (U_{rc} - U_N) / U_N$
储蓄比率	$R_{ss} = P_{res} / (P_1 + P_{ess-c}^{\max})$	电压波动	$U_t = (U_{\max} - U_{\min}) / U_N$
消纳率	$\theta = P_{res} / P_{res}^{\max}$	频率偏差	$\Delta f = (f_{rc} - f_N) / f_N$
负载率	$\theta_1 = P_{load} / P_{load}^{ref}$	电压合格率	$K_{zu} = U_{2(1)} / U_e$

式中  $P_{res}^*$ 、 $P_{ess-c}^{\max}$  和  $P_{res}^{\max}$  为分布式电源额定容量, 最大蓄电功率和最大允许出力,  $P_1$  和

$P_L^{\max}$  为配网有功负荷和最大负荷,  $P_{load}$  和  $P_{load}^{ref}$  为馈线负荷功率及额定值。  $U_{rc}$ ,  $U_N$  为电压测量值和额定值。  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  为最小运行方式公共供电点相邻电压的均方根最大、最小值。  $f_{rc}$  和  $f_N$  为频率测量值和额定值。

### 1.3 控制层动态指标类

主动配电网主动控制层动态指标包含控制装置响应偏差  $\Delta C$  和控制装置分辨率偏差  $\Delta d$ 。

表 2 控制层动态指标

响应偏差	$\Delta C = (C_{rc} - C_N) / C_N$	分辨率偏差	$\Delta d = (d_{rc} - d_N) / d_N$
------	-----------------------------------	-------	-----------------------------------

$C_{rc}$ ,  $C_N$  为采样窗内最终响应值和控制指令值。  $d_{rc}$ ,  $d_N$  为实际控制分辨率和理想值。

## 2 主动配电网多层动态指标体系

### 2.1 馈线整体动态指标体系

如图 3 所示,多层动态模糊评估器由各个基本模糊评估单元构成,对标准化输入量  $\delta$  的模糊化方法如图 4 所示。解模糊环节采用如式(10)所示重心法,  $x_i$  为输出模糊值,  $u(x_i)$  为隶属度值。

$$\delta = \sum_i x_i \mu_i(x_i) / \sum_i \mu_i(x_i) \quad (10)$$

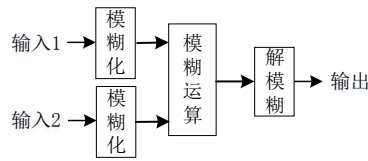


图3 模糊系统基本架构

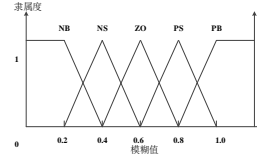


图4 模糊化规则图

至此，可以得到各馈线健康状况。

## 2.2 主动配电网多层动态指标体系

总指标  $Y$  计算过程主要考虑馈线重要程度和健康状况，如式(11)所示。式中， $\delta_i$  和  $x_i$  为馈线重要度系数和健康状况。

$$Y = \min \left\{ \delta_i x_i / \sum_{i=1}^N \delta_i \right\} \quad (11)$$

归一化的配电网动态总指标系数取值范围如表3所示。

表3 主动配电网运行状态的动态总指标层级划分

总指标等级	恶化	危险	脆弱	正常	良好
总指标系数	[0, 0.2)	[0.2, 0.4)	[0.4, 0.6)	[0.6, 0.8)	[0.8, 1]

评估等级良好时，各项运行指标健康。评估为正常时，分布式电源渗透率提升，但未超过配电网调节能力。评估为脆弱时，谐波、电压越限等问题逐步体现。评估为危险时，部分关键设备极限运行。评估为恶化时，关键设备大面积故障，需立即进行故障排查。

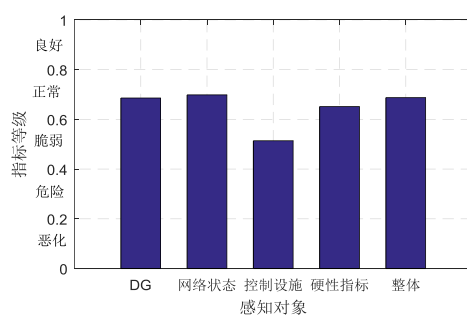
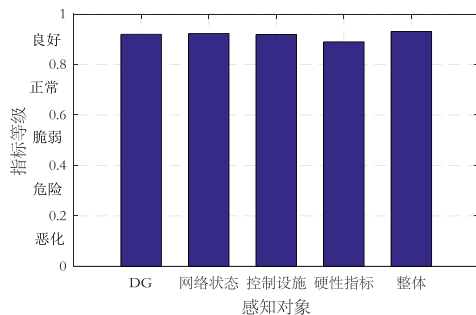
## 3 算例分析

以 IEEE34 标准模型中与 842, 844, 8426 和 848 节点连接的四条馈线为对象，测试上述主动配电网运行多层动态评估策略。每条馈线包含分布式电源、储能、负荷和控制调节装置。IEEE34 标准模型中各馈线单元标准化健康状态见表4。

表4 IEEE34 标准测试模型以及馈线各单元的标准化健康状态

评估对象	馈线 842 运行健康状况				馈线 844 运行健康状况			
分布式电源	0.78	0.80	0.84	0.87	0.62	0.63	0.69	0.63
配电网	0.82	0.78	0.87	0.78	0.43	0.63	0.62	0.57
控制健康	0.78	0.84	/	/	0.50	0.48	/	/
硬性指标	0.80	0.81	0.81	0.76	0.59	0.64	0.63	0.46
评估对象	馈线 846 各单元的标准化健康状态				馈线 848 各单元的标准化健康状态			
分布式电源	0.24	0.47	0.60	0.38	0.38	0.58	0.58	0.58
配电网	0.31	0.43	0.28	0.15	0.40	0.57	0.50	0.47
控制健康	0.20	0.19	/	/	0.42	0.48	/	/
硬性指标	0.56	0.26	0.41	0.46	0.50	0.66	0.47	0.42

采用含分布式电源的主动配电网运行感知方法进行评估，各馈线整体健康状况如图6。



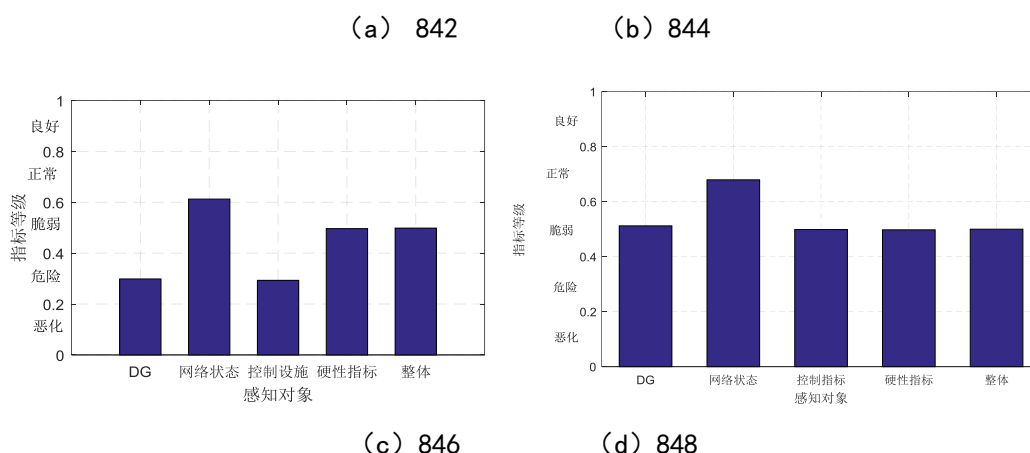


图 6 馈线整体健康状态

由图 6 可见，馈线 842 运行状态良好。馈线 844 运行状态正常，控制设施脆弱，但其他各项均正常运行，要加强无功控制的监测和维护。馈线 846 运行状态脆弱，分布式电源和控制设施处于危险状态，需要即时排查和检修。馈线 848 网络状态正常，其他各项运行脆弱，需进一步监测和维护。四馈线具备相同重要程度，结合模糊系统可评估其组成配电网运行状态为正常。

根据主动配电网评估等级（恶化，危险，脆弱，正常，良好）可初步评估当前主动配电网运行状态，为进一步状态检测提供指导建议。评估等级良好时，各分布式电源实时渗透率低。评估为正常时，配电网关键运行指标健康。评估为脆弱时，部分分布式电源渗透率已超过电网调节能力，但在各关键设备承受范围内。评估为危险时，谐波大量增加，电压越限问题频繁出现。评估为恶化时，关键设备大面积故障，需立即进行故障排查，恢复电网安全稳定运行。

## 4 结论

针对主动配电网复杂运行状态、灵活控制方式与多样评价指标的特点，本文提出含分布式电源的主动配电网运行感知方法。所提运行感知的多层动态指标体系包含分布式电源、主动配电网柔性硬性和控制装置指标体系等多个子成分。通过模糊评估方法，将上述各子体系集成整体动态指标评估方案。最后，采用 IEEE 34 节点配网模型的拓扑与运行信息作为算例进行研究，验证了该感知方法的有效性。

### 参考文献：

- [1] 戴志辉, 陈冰研等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18):121-127.
- [2] 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.
- [3] 李少前. 主动配电网规划研究[D]. 山东: 山东大学, 2018. 21-24.
- [4] 熊雄, 井天军等. 主动配电网下多微电网功率协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(06):15-21.
- [5] 王守相, 梁栋等. 智能配电网态势感知和态势利导关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12):2-8.
- [6] 谢笑寒, 董新等. 分布式电源对配电网影响与协调控制策略研究[J]. 山东工业技术, 2018(21):174.
- [7] 杨风生, 曾惜等. 面向大数据应用的配电网运行状态评估方法探讨[J]. 科技与创新, 2018(17):4-6.
- [8] 赵辰宇. 智能配网主动运维及节能降损关键技术研究与应用[D]. 山东: 山东大学, 2017. 30-35.
- [9] 吴争荣, 俞小勇等. 基于状态估计的配电网实时态势感知与评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(03):140-145.
- [10] 马丽叶, 卢志刚等. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(08):163-171.
- [11] 黄伟, 熊伟鹏等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(15):3486-3498.
- [12] 赵辰宇. 智能配网主动运维及节能降损关键技术研究与应用[D]. 山东: 山东大学, 2017. 32-34.
- [13] 刘伟, 高永宽. 配网设备运行维护与状态检修管理研究[J]. 科技风, 2018(21):165.
- [14] 边海峰, 张超等. 光伏系统储能设备状态评估技术研究[J]. 电气应用, 2017, 36(21):58-64.