

机组一次调频性能多层次模糊综合评价方法

施秀萍^{1,2}, 张道农³, 黄远超^{1,2}, 李天琦^{1,2}, 梁晓东^{1,2}

1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司 南京 210000;

2. 中电普瑞电力工程有限公司 北京 102200;

3. 华北电力设计院有限公司 北京 100011;

Multi-level fuzzy comprehensive evaluation method for generator unit primary frequency modulation performance

Shi Xiu-ping^{1,2}, Zhang Dao-nong³, Huang Yuan-chao^{1,2}, Li Tian-qi^{1,2}, Liang Xiao-dong^{1,2}

1. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute Nanjing; 2. C-EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd, Beijing; 3. North China Power Design Institute Co. Ltd, Beijing.

摘要: 为了全面、客观、科学地评价机组一次调频安全运行性能, 提出了机组一次调频安全运行多层次模糊综合评价方法。该方法首先基于层次分析法建立机组一次调频安全运行性能指标体系和多层次模糊综合评价模型, 然后构建判断矩阵确定各层次间的权重, 最后引入模糊行为指标和隶属度函数综合考虑机组一次调频安全运行。本方法在层次分析法的基础上进行模糊综合评价实现对各机组一次调频性能的系统、全面、定量的评价, 完成了机组一次调频的相对优劣排序。并通过算例分析验证了机组一次调频安全运行多层次模糊综合评价方法的有效性和可行性。

关键词: 机组一次调频安全运行; 多层次分析; 模糊综合评价

ABSTRACT: In order to comprehensively and objectively and scientifically evaluate the safety performance of the generator unit's primary frequency modulation, a multi-level fuzzy comprehensive evaluation method for the generator unit's primary frequency regulation and safety operation is proposed. Firstly, based on the analytic hierarchy process, the generator unit's primary frequency safety performance index system and multi-level fuzzy comprehensive evaluation model are established. Then the judgment matrix is constructed to determine the weight between each level. Finally, the fuzzy behavior index and membership function are introduced to consider the generator unit's primary frequency regulation safe operation. Based on the analytic hierarchy process, the method performs fuzzy comprehensive evaluation to realize the systematic, comprehensive and quantitative evaluation of the primary frequency modulation performance of each generator unit, and completes the relative ranking of the generator unit's primary frequency modulation. The validity and feasibility of the multi-level fuzzy comprehensive evaluation method for the unit frequency-controlled safe operation of the generator unit are verified by an example.

KEY WORD: Generator unit frequency control safe operation; Multi-level analysis; Fuzzy comprehensive evaluation

1 引言

发电机组作为电力系统中最重要动态元件, 在电力系统安全和稳定运行中起到基础性的支撑作用。电力系统频率反映了有功功率的供需平衡情况, 由于电力系统负荷一直在变动中, 负荷波动势必导致电力系统的频率的波动, 因此电网的一次调频能力对于电网的安全运行有重要意义, 一次调频能力是否满足要求, 直接反映电网在符合变化时保证安全运行的能力。随着电力系统容量的不断增大, 电力系统的安全稳定控制变得更加复杂和困难, 由于机组特性及一次调频

控制策略方面的原因, 在各大电网加强对电厂一次调频考核的情况下, 有许多机组的一次调频动作准确性和调频质量并不能满足电网调频的需要。

本文参考相关文献[1-8], 建立了机组一次调频安全运行性评价指标体系, 构建了机组一次调频安全运行多层次模糊综合评价模型, 实现了层次分析法和模糊综合评价法的有机结合, 首先通过层次分析法确定准则层和各指标权重, 然后用模糊综合评价法对机组一次调频安全运行状况进行综合评价; 其中模糊综合评价是在层次分

析法的基础上进行的,两者相辅相成,共同提高了发电机组一次调频性能监测及评价的可靠性与有效性,为电网的安全稳定运行提供了有力的支撑。

2 一次调频性能考核评价指标

本文遵循全面反映一次调频系统各方面要求的特征原则,结合机组一次调频运行实际建立机组一次调频运行技术性评价指标体系,主要包括机组出力响应指标、调节幅度指标、电量贡献指标、调差系数指标、速度变动率指标等,实现对该安全性评价体系归类分析,从电网运行安全性指标体系的多个方面进行分析,所有指标可由机组实际运行情况获得评价数据,最后利用机组一次调频多层次模糊综合评价方法实现机组一次调频运行安全的综合评价。

2.1 出力响应指标

电网频率变化达到一次调频动作值到机组负荷开始向频率恢复方向变化所需的时间,称为响应滞后时间,响应滞后时间反映了机组一次调频响应的快慢程度,因此,可通过响应滞后时间对调节速度指数 I_s 进行量化,而在江苏电网一次调频考核过程中为了更加充分体现机组一次调频初始时段的快速性和有效性,则通过一次调频初始时段内一次调频实际贡献电量占理论贡献电量的百分比对调节速度指数 I_s 进行量化。

$$I_s = H / H_c \times 100\%$$

式中, H 为一次调频初始时段实际贡献电量; H_c 为一次调频初始时段理论贡献电量。

2.2 调节幅度指标

电网频率变化达到一次调频动作值后,机组负荷需要跟随频率的变化进行精确调整,为了将频率快速调整至死区内,机组负荷需要快速调节到一定的幅度。因此,可通过机组一次调频应动作时段内,机组实际最大出力调整量占理论最大出力调整量的百分比对调节幅度指数 I_r 进行量化。

$$I_r = X_1 / Y_1 \times 100\%$$

式中, X_1 为机组实际最大出力调整量; Y_1 为机组理论最大出力调整量。

2.3 电量贡献指标

机端频率变化超过一次调频死区下限(或上限)开始,机组一次调频应动作时段内,有功发电量比频率不超过一次调频死区下限(或上限)情况下的发电量多出(或减少)的部分,称为一次调频贡献电量,反映了机组在参与一次调频过程中对负荷扰动的贡献。因此,调节精度指数 I_c 可用机组一次调频应动作时段内,机组一次调频实际贡献电量占理论贡献电量的百分比进行表示。

$$I_c = P / P_e \times 100\%$$

式中, P 为一次调频实际贡献电量; P_e 为一次调频理论贡献电量。

2.4 调差系数指标

调差系数是与机组单位调节功率互为倒数关系,标志了随频率的升降发电机组发出功率减少或增加的多寡,是考核发电机组一次调频特性的最重要指标之一。当发生一次调频后,调差系数可根据频率、功率实时值计算得到,一般来说,汽轮发电机组的调差系数要求小于 5%。

$$\delta = - \frac{(f_m - f_0) / f_N}{(P_m - P_0) / P_N} \times 100\%$$

式中: f_0 、 P_0 分别对应频率、有功的一次调频开始时刻值; f_m 、 P_m 分别对应频率、有功在本次调频过程中的极值; f_N 、 P_N 分别对应频率、有功的额定值。

2.5 速度变动率指标

当电网频率变化时,引起的负荷变化与机组调节系统速度变动率成反比。也就是当外界负荷变化时,速度变动率越大,分给该机组的负荷变化量就越小,反之就越大。因此带基本负荷的机组,其速度变动率应该选择大一些,使电网频率改变时,负荷变化较小,即减小参加一次调频的作用,使之近似保持基本符合不变,一般 δ 取 4%-6%。火电机组平均速度变动率计算公式如下:

$$\bar{\delta} = - \frac{\overline{\Delta n} / n_0}{\Delta q / P_0} \times 100\%$$

式中: $\bar{\delta}$ —平均速度变动率; n_0 —机组额定转速, 3000r/min; ($n=60f$); $\overline{\Delta n}$ —转速变化量

平均值, 转速实际值的平均值-额定转速; P_0 —起始功率; Δq —一次调频实测积分电量。

3 多层次模糊综合评价模型

3.1 模糊综合评价模型

(1) 评价系统的层次分析

将总目标 A 分为 5 个准则 B_i , $i=1, 2, \dots, 5$ 。即:

$$A=\{B_1, B_2, \dots, B_5\}=\{\text{优, 良, 中, 及格, 差}\} \quad (3-1)$$

而准则 B, 又包含 m 个指标, m 的具体数值由 i 准则层下的指标数来决定。

$$B_i=\{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{im}\} \quad (3-2)$$

式中 C_{im} 表示为第 i 准则层下的第 m 个具体指标, 即

$C_m=\{\text{出力响应指标 } C_1, \text{调节幅度指标 } C_2, \text{电量贡献指标 } C_3, \text{调差系数指标 } C_4, \text{速度变动率指标 } C_5\}$

(2) 各层次的权重值

权重值包括准则层相对于总目标层的权重集 WB 和指标层相对于准则层的权重集 WC。即:

$$WB=(WB_1, WB_2, \dots, WB_5) \quad (3-4)$$

$$WC=(WC_1, WC_2, \dots, WC_5) \quad (3-5)$$

$$WCI=(WCI_1, WCI_2, \dots, WCI_m) \quad (3-6)$$

其中, im 表示第 $i(i=1, 2, \dots, 5)$ 个准则所含的指标数为 m, 权重用层次分析法来确定。

(3) 评价等级标准集合

$$V = \begin{bmatrix} V_{111} & V_{112} & V_{113} & V_{114} & V_{115} \\ V_{121} & V_{122} & V_{123} & V_{124} & V_{125} \\ V_{131} & V_{132} & V_{133} & V_{134} & V_{135} \\ V_{1\Lambda} & V_{1\Lambda} & V_{1\Lambda} & V_{1\Lambda} & V_{1\Lambda} \\ V_{551} & V_{552} & V_{553} & V_{554} & V_{555} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

其中 V_{imj} 表示第 $i(i=1, 2, \dots, 5)$ 准则层下的第 m 个具体指标所对应的第 $j(j=1, 2, \dots, 5)$ 级评价标准, 即为“优、良、中、及格、差”五种状态的标准。这一集合规定了评价因素(指标)的评价结果的选择范围。

(4) 指标隶属度矩阵 R

$$R=(R_1, R_2, \dots, R_5)T$$

$$R_i = \begin{bmatrix} R_{i11} & R_{i12} & R_{i13} & R_{i14} & R_{i15} \\ R_{i21} & R_{i22} & R_{i23} & R_{i24} & R_{i25} \\ R_{i31} & R_{i32} & R_{i33} & R_{i34} & R_{i35} \\ R_{i\Lambda} & R_{i\Lambda} & R_{i\Lambda} & R_{i\Lambda} & R_{i\Lambda} \\ R_{i51} & R_{i52} & R_{i53} & R_{i54} & R_{i55} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

式中, R_i 为第 i 个准则的隶属度矩阵($i=1, 2, \dots, 5$), im 表示第 i 个准则所含的指标数为 m。

(5) 分层模糊评价流程

机组一次调频安全运行评价指标体系共分为三层, 因此可进行两级模糊综合评价, 即指标层对准则层和准则层对目标层的评价。

指标层对准则层的模糊评价为:

$$B=(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5)T$$

$$B_i=W_{ci} \cdot R_i=(W_{ci1}, W_{ci2}, \dots,$$

$$W_{cim}) \cdot \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ r_{i31} & r_{i32} & r_{i33} & r_{i34} & r_{i35} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ r_{i51} & r_{i52} & r_{i53} & r_{i54} & r_{i55} \end{bmatrix} \\ = (B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4}, B_{i5}) \quad (3-9)$$

式中 W_{ci} 为第 $i(i=1, 2, \dots, 5)$ 准则的模糊评价。

从而准则层对目标层的模糊评价为:

$$S = W_B \cdot B$$

$$= (W_{b1}, W_{b2}, \dots, W_{b5}) \cdot \begin{bmatrix} W_{c1} \cdot R_1 \\ W_{c2} \cdot R_2 \\ W_{c3} \cdot R_3 \\ W_{c4} \cdot R_4 \\ W_{c5} \cdot R_5 \end{bmatrix} \quad (3-10) \\ = (S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)$$

式中, S_j ($j=1, 2, \dots, 5$) 为机组一次调频安全运行对第 j 等级的隶属度, s 为机组对五个准则评价级别的隶属度矩阵, 运算“ \cdot ”。

3.2 评价结果的分析方法

若上述计算的隶属度矩阵 S 不满足

$$\sum_{i=1}^5 s_i = 1$$

则需要对评价结果进行归一化处理, 即

$$p_j = \frac{S_j}{\sum_{j=1}^5 S_j}, (j = 1, 2, \dots, 5) \quad (3-11)$$

从而使 $\sum_{j=1}^5 P_j = 1$ 经归一化处理后得到新的判断矩阵:

$$P = (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5) \quad (3-12)$$

根据最大隶属度原则, 选取 $\max(P_j)$ 相对应的评价等级作为评价结果, 从而对机组一次调频安全运行所处的状态做出科学地判断和比较。

4 应用实例

以某电厂 3 个机组的实际运行情况为例, 进行分析比较。首先根据层次分析法确定指标权重, 再构建隶属度矩阵内容, 最后依据公式得出 3 个机组综合评价结果。

4.1 层次分析法确定指标权重

根据层次分析法确定权系数的理论方法, 通过设计机组一次调频安全运行性能评价指标重要度比较, 然后邀请 10 位专家对各级评价中各个因素的重要程度进行两两比较, 通过对咨询结果进行整理后得判断矩阵, 运用 Matlab 数学工具计算各个判断矩阵的最大特征值和最大特征根对应的归一化向量, 并检验判断矩阵的一致性, 确定的权系数结果。根据判断矩阵层次单排序与权系数赋值结果, 可分别求出 C 层各指标对于总目标 A 的权系数, 结果如附录 1 中表 1 所示, 并按照指标层 C 相对于 A 层的权重进行排序。

4.2 隶属度矩阵的确定

采用专家打分法与实地调查相结合的方法确定隶属度矩阵, 邀请专家根据定性指标评价等级标准, 对研究机组一次调频运行状况进行打分, 采用百分制统计法统计专家意见, 最终得到定性指标的隶属度矩阵。

表 2 综合评价隶属度矩阵

Tab 2 Comprehensive evaluation of membership matrix

状态	优	良	中	及格	差
评价指标					

出力响应指标	0	0.7	0.3	0	0
调节幅度指标	0.5	0.5	0	0	0
电量贡献指标	0	0.6	0.4	0	0
调差系数指标	0	0	0.32	0.34	0.34
速度变动率指标	0.2	0.6	0.1	0.1	0

4.3 分层模糊评价

1) 一级综合评价

$$B_i = W_{C_i} \circ R_i = (W_{c1}, W_{c2}, \dots, W_{c5}) \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & r_{i14} & r_{i15} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & r_{i24} & r_{i25} \\ r_{i31} & r_{i32} & r_{i33} & r_{i34} & r_{i35} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ r_{im1} & r_{im2} & r_{im3} & r_{im4} & r_{im5} \end{bmatrix}$$

$$= (B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}, B_{i4}, B_{i5})$$

式中 B_i 为第 i ($i=1, 2, \dots, 5$) 准则的模糊评价, W_{cim} 表示第 i ($i=1, 2, \dots, 5$), 准则层下第 m 个指标相对于准则层 m 的权重, 由各个指标模糊运算结果生成一级评判结果。

表 3 机组一次调频性能指标的原始数据

Tab 3 Raw data of the unit's primary FM performance indicator

评价指标	机组 1	机组 2	机组 3
出力响应指标	0.7433	0.7567	0.8104
调节幅度指标	0.8267	0.7033	0.7667
电量贡献指标	0.8324	0.8736	0.5539
调差系数指标	0.7122	0.3101	0.7162
速度变动率指标	0.8637	0.8538	0.4038

2) 二级综合评价

根据公式, 由准则层 B 相对目标层 A 的权重及一级综合评价的结果可计算出最终的综合评判结果, 计算过程如下, 结果见表:

表 4 机组综合评价结果

Tab 4 Unit comprehensive evaluation result

排行	机组名称	评价值
1	机组一	97.25
2	机组二	95.375
3	机组三	92.25

从综合评价结果看, 机组 1 的综合评价结果最好, 机组 2 次之, 机组 3 最差。

5 结语

本文采用理论与实践相结合的方法,对机组一次调频性能安全运行状况及其评价方法进行较为系统的研究,建立了机组一次调频性能评价指标,并构建了机组一次调频性能安全运行多层次模糊综合评价模型方法。在确定评价因素、因子的评价等级标准和权值的基础上,运用模糊集合变换原理,以隶属度描述各因素及因子的模糊界线,构造模糊评判矩阵,通过多层的复合运算,最终确定评价对象所属等级,建立了机组一次调频性能安全运行评价的多层次模糊综合评价模型。利用实际数据进行的算例分析表明采用多层次模糊综合法可以比较全面、完整、客观的反映多个机组的一次调频性能运行综合评价等级和排序,验证了所提方法的客观性和有效性。

参 考 文 献

- [1]林济铿,李童飞,赵子明, et al. 基于熵权模糊综合评价模型的电力系统黑启动方案评估[J]. 电网技术, 2012, 36(2):115-120.
- [2]姜丁建,寿挺,朱铁铭, et al. 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013(21):52-57.
- [3]肖峻,崔艳妍,王建民,等. 配电网规划的综合评价指标体系与方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(15):36-40.

- [4]宋连峻,徐志勇. 电网项目后评价研究——基于改进模糊层次法[J]. 技术经济, 2009, 28(10):52-54.
- [5]王新,李祥. 飞行安全模糊综合评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3).
- [6]王佳明,刘文颖,李群炬, et al. 基于多层次模糊综合评价模型的短路电流限制措施优化配置[J]. 电网技术, 2011, 35(11):125-129.
- [7]肖运启,王昆朋,贺贯举, et al. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13):2132-2139.
- [8]王雁凌,张雪佼,阎敬民. 基于变权灰云模型的风电场并网技术性综合评价[J]. 电网技术, 2013(12).
- [9]王一振,马世英,王青, et al. 大型火电机组动态频率响应特性[J]. 电网技术, 2013, 37(1):106-111.
- [10]谈博,陈志刚,顾涛, et al. 机组一次调频特性在线监测方法[J]. 中国电力, 2017, 50(12).

作者简介:

- 施秀萍 (1969-), 女, 上海, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统 WAMS 高级应用系统设计和开发工作。
- 张道农 (1961-), 男, 北京, 硕士, 教授级高级工程师, 设计总工程师, 主要从事继电保护及安全自动装置的设计与研究以及大型工程项目的管理工作。
- 黄远超 (1985-), 男, 四川, 学士, 工程师, 主要研究方向为电力系统 WAMS 高级应用系统设计和开发工作。
- 李天琦 (1989-), 男, 河北, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统 WAMS 高级应用系统设计和开发工作。
- 梁晓东 (1988-), 男, 山东, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统 WAMS 高级应用系统设计和开发工作。

附录 1

表 1 各层指标权重列表

Tab 1 List of indicator weights for each layer

目标层 A	准则层 B	指标层 C			
机组一次调频安全运行状况	子因数(权重)	具体指标 C	C层指标相对于B层的权重	C层指标相对于A层的权重 W_{js}	重要性总排序
	机组一次调频运行等级状况	出力响应指标	0.121	0.019	4
		调节幅度指标	0.254	0.032	3
		电量贡献指标	0.126	0.042	1
		调差系数指标	0.221	0.021	2
		速度变动率指标	0.112	0.037	5