

Selection of main electrical connection scheme in power plant based on grey correlation and analytic hierarchy process

Qiwen Ren Wei Li Kexuan Liu Yan Nie

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250101, China

Abstract

This paper establishes the comprehensive evaluation index system of the main electrical connection scheme. The grey correlation coefficient is used to replace the membership degree, and the analytic hierarchy process (AHP) is used to solve the weight coefficient. The multi-level comprehensive evaluation model of the main electrical wiring is established, and the multi-level fuzzy comprehensive evaluation is carried out. It provides a relatively quantitative and more objective method for the scheme selection of the main electrical wiring in power plants.

Keywords

correlation analysis; Analytic hierarchy process; Main electrical wiring; Multilevel comprehensive evaluation

基于灰关联和层次分析法的发电厂电气主接线方案选择

任其文 李玮 刘克轩 聂岩

山东电力工程咨询院有限公司, 中国·山东 济南 250101

摘要

本文建立了电气主接线方案综合评价指标体系。将灰关联系数代替隶属度, 用层次分析法(AHP)求解权重系数, 建立了电气主接线的多级综合评判模型, 并进行了多级模糊综合评判。为发电厂电气主接线的方案选择提供了一种相对量化、更客观的方法。

关键词

关联分析; 层次分析; 电气主接线; 多级综合评判

1 引言

电气主接线是发电厂电气设计的首要内容, 必须全面分析有关影响因素, 通过技术经济比较, 合理确定主接线方案。在进行电气主接线方案比选时, 常规方法仅在主接线型式的基本定义和适用范围层面定性比较, 辅以简单经济估算对比, 最终做出的判断缺少量化, 且个人主观性较强。本文旨在主接线方案比选中引入一种综合评判方法, 将定性分析向下细化分解主要因素, 并引入相对量化的指标体系, 同时将灰关联系数代替隶属度, 用层次分析法求解权重系数, 通过多级模糊综合评判, 得到更加客观科学的比选结果。

2 主接线方案评价指标体系

电气主接线的设计应考虑满足可靠性、灵活性、经济性等相关要求, 做到远、近期结合, 应以近期为主, 并留有扩建的条件。

2.1 可靠性指标

电气主接线的可靠性主要包括元件可靠性、事故范围的限制能力、母线故障的影响等方面。

2.1.1 元件的可靠性

指该元件(如断路器、母线、隔离开关、接地开关等)在电厂高压配电装置这个严苛、动态的环境中, 能否具备“需要其工作时能稳定工作; 需要其断开时能可靠断开; 万一其出现问题, 也是可控且影响最小的”这种综合能力的概率度量。每个元件的可靠性主要由以下几个核心参数描述:

故障率: 单位时间内元件发生故障的平均次数。不同元件有不同的故障模式, 如拒动、误动、开断失败、绝缘故障、机构故障等, 各类元件的故障率可参考行业相关数据, 如 IEEE Std. 493。

平均修复时间: 从故障发生到故障修复、元件重新投入运行所需的平均时间。断路器等开关设备因为有备件可更换, 平均修复时间通常约为 24-72 小时; 而变压器/发电机因现场检修复杂, 可能需要返厂, 因此平均修复时间可达 30-90 天。

计划检修停运时间及周期: 元件按计划进行预防性试

【作者简介】任其文(1985-), 男, 硕士, 中国山东莱芜人, 从事发电厂电气设计与研究。

验和维护所需的停运时间及其发生频率。主接线设计必须保证在任一元件计划停运时，不影响或最小化对供电的影响。

可用度：元件在长期运行中处于可用状态的概率。 $A = \text{平均无故障工作时间} / (\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间})$ 。可用度是一个综合性指标。即使一个元件故障率稍高，但如果修复极快，其可用度也可能很高。

2.1.2 事故范围限制能力

主要体现主接线方案的“防御性”设计，即当不可避免的故障发生时，系统的固有结构如何将其控制在局部。具体体现在以下几个层面：

故障元件的隔离能力：当系统中任何一个元件发生故障时，继电保护系统能否精准、快速地动作，断开最少数量的开关，从而将故障元件从正常系统中隔离出去。

避免事故扩大的能力（防御级联故障）：防止因一个元件的故障或误操作，引发相邻或多个元件的连锁故障，最终导致系统崩溃。

对控制保护系统的要求与影响：复杂的主接线（如一个半断路器接线）虽然限制事故范围的措施相对较多，但其保护配置（如短引线保护、断路器失灵保护）和运行操作逻辑也更为复杂，这本身会引入新的风险。

2.1.3 母线故障的影响

在发电厂电气主接线中，母线是电能的汇集和分配中心，一旦发生故障，影响往往是最严重的。不同接线形式下，母线故障的影响差别较大。分析母线故障的影响，主要从以下四个方面进行考量：

- 对连接元件的影响范围（停电范围）
- 对电厂出力和系统稳定性的影响
- 故障恢复时间和操作复杂性
- 对保护系统的要求和动作行为

2.2 灵活性指标

2.2.1 调度灵活性

主要指电厂在日常运行中响应电网实时需求、适应系统工况变化的能力。主要体现在以下三个方面：

- 潮流调控与电源 / 负荷的再分配能力
- 运行方式切换的便捷性与风险
- 故障或异常工况后的自适应与恢复能力

2.2.2 检修灵活性

主要指在保证电厂绝大部分设备持续供电的前提下，安全、方便地对某一特定设备进行停电维护、预试和检修的能力。主要体现在以下四个方面：

- 母线检修的灵活性
- 断路器检修的灵活性
- 其他主要设备（如变压器、线路）检修的灵活性
- 检修时的电气隔离与安全保障

2.2.3 扩建灵活性

指电厂为满足未来需求而新增发电机、变压器或出线

时，对现有系统的影响程度、工程实施的难易度以及成本效益。扩建灵活性直接关系到电厂的可持续发展能力。不同接线形式的差异主要体现在预留空间与接口的清晰度（规划的便利性）和扩建过程中对现有系统运行的影响。

2.3 经济性指标

2.3.1 投资经济性

主要指初始投资，是最直接、最明显的经济性差异，主要取决于设备的数量、类型和土地占用。主要考虑以下几个因素：

主要电气设备成本。其中断路器数量是决定性因素，特别是高压、大容量的断路器，是配电装置中最昂贵的设备，其数量直接决定了投资高低。

配电装置占地与土建成本。设备数量越多，接线形式越复杂，所需的配电装置场地面积就越大。更大的占地面积意味着更高的土地征用、场地平整、架构和基础建设成本。

控制与保护系统成本。接线越复杂，所需的继电保护装置、电流电压互感器、控制电缆和监控系统就越复杂。

2.3.2 运行经济性

指主接线在正常运行期间产生的费用，包含以下几个因素：

电能损耗。接线中串联的节点（断路器、隔离开关、母线）越多，路径越长，产生的电能损耗就越大。

运维成本。主要是定期检修与预防性试验费用。设备数量越多，每年的预防性试验和定期检修工作量越大，成本越高。

上述三方面的指标和各类比较因素构成了发电厂电气主接线综合评判指标体系，见图 1。

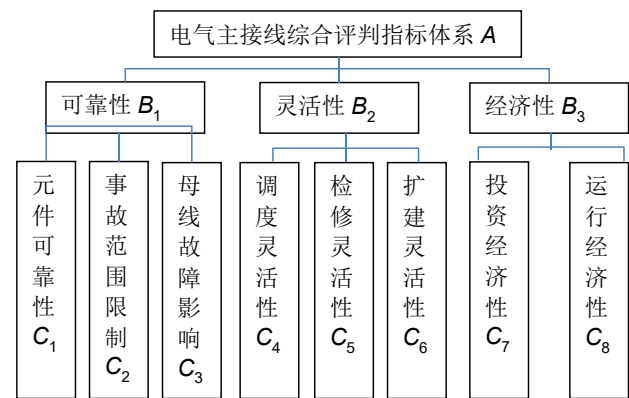


图 1 电气主接线综合评判指标体系

3 模糊综合评判理论及主要步骤

模糊综合评判模型可表述为： $B = A \circ R = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ ，其中， A 表示指标权重集合， R 为模糊关系矩阵， B 则为综合评判的结果向量。根据评判结构的层次性，模糊综合评判可分为单级综合评判与多级综合评判两类。多级评判基于单级评判结果构建，其高层评判矩阵来源于低层评判的输出。

3.1 单级综合评判

3.1.1 评判指标的确定

评判指标是指用于评估对象性能或属性的度量项，构成综合评判的基本依据。如图1所示，第一级评判指标为性能指标B，第二级为动态特性指标C。

3.1.2 最优指标集的确定

设评判系统包含m项评判指标与n个待评方案，最优指标集 U_0 定义为各指标在所有方案中的最优值所构成的集合，记为： $U_0=(u_{10},u_{20},\dots,u_{m0})$ ，其中 $u_{i0}(i=1,2,\dots,m)$ 为指标 X_i 在所有方案中的理想值。该集合 U_0 作为评判的基准方案。

3.1.3 模糊关系矩阵的确定

对于任一比较方案 $U_j(j=0,1,2,\dots,n)$ ，均对应一个指标值集合： $U_j=(u_{1j},u_{2j},\dots,u_{mj})$ ，其中 u_{ij} 表示方案 U_j 在指标 X_i 的取值，基于各方案的原始数据，首先构建原始数据矩阵，并进行无量纲化处理，得到标准化数据矩阵：

$$V = \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ M \\ U_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{10} & u_{20} & \Lambda & u_{m0} \\ u_{11} & u_{21} & \Lambda & u_{m1} \\ M & M & M & M \\ u_{1n} & u_{2n} & M & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

进一步对比较方案与参考方案 U_0 进行关联分析，可求得各方案指标相对于其理想值的关联系数：

$$\gamma_j(i) = \frac{\min_j \min_i |u_{ij} - u_{i0}| + \zeta \max_j \max_i |u_{ij} - u_{i0}|}{|u_{ij} - u_{i0}| + \zeta \max_j \max_i |u_{ij} - u_{i0}|} \quad (2)$$

其中， $\min_j \min_i |u_{ij} - u_{i0}|$ 为两级最小差， $\max_j \max_i |u_{ij} - u_{i0}|$ 为两级最大差， ζ 为分辨系数且通常取值为0.5， ζ 反映了在综合考虑所有比较方案中各项指标影响的情况下，方案 U_j 在指标 X_i 接近理想方案的程度，亦可视为该指标对理想值的隶属程度。从几何意义上讲，关联系数与隶属度具有相似性。该方法不仅考虑了各指标的独立影响，也融合了相关指标对其隶属程度的作用，从而体现了方案评价的系统性与整体性。基于所获得的关联系数，构造模糊关系矩阵R：

$$R = \begin{bmatrix} \gamma_1(1) & \gamma_2(1) & \Lambda & \gamma_n(1) \\ \gamma_1(2) & \gamma_2(2) & \Lambda & \gamma_n(2) \\ M & M & M & M \\ \gamma_1(m) & \gamma_2(m) & \Lambda & \gamma_n(m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.1.4 指标权重集的确定

由于各评价指标在系统中所处地位及其对核心行为的影响程度存在差异，需借助模糊子集 $A=(a_1,a_2,\dots,a_m)$ 对各项指标的权重进行量化表征， $a_i \in [0,1]$ 且满足 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。本研究采用层次分析法(AHP)确定各评价指标的权重系数。

针对评价指标 X_1, X_2, \dots, X_m ，依据其对整体评价目标的重要程度，采用T. L. Saaty提出的九级量化标度，通过专

家对指标进行两两比较，构造m阶判断矩阵P。该矩阵满足以下性质： $p_{ij} > 0$ ； $p_{ii} = 1$ ； $p_{ji} = 1/p_{ij}$ ，即P为一正互反矩阵。

在判断过程中，由于主观评价可能引入不一致甚至矛盾的判断，因此需对矩阵P进行一致性检验，以评估其逻辑可靠性。在本研究中，判断矩阵P的一致性检验按如下步骤进行：首先计算其最大特征值 λ_{max} ，进而根据矩阵阶数m查阅相应的平均随机一致性指标标准值。一致性比率CR由下式给出：

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

其中：

$$CI = \frac{\lambda_{max} - m}{m - 1} \quad (4)$$

为一致性指标。当 $CR < 0.1$ 时，认为判断矩阵P具有可接受的一致性；此时，计算对应于 λ_{max} 的特征向量，并将其进行归一化处理，所得结果即为各项评价指标的权重集合A。

3.1.5 综合评判

基于前述方法所确定的评判矩阵与指标权重集，通过模糊合成运算，即可得到最终的模糊综合评判结果集T：

$$T = A \circ R = (t_1, t_2, K, t_n) \quad (6)$$

式中， $t_j = \sum_{i=1}^m a_i \cdot \gamma_j(i)$ 。

3.2 多级综合评判

在复杂系统的评价中，为有效区分不同层次因素的地位与作用，从而整合其提供的全部信息，需采用多级综合评判方法。本文构建的发电厂电气主接线评价体系包含可靠性、灵活性与经济性三项二级指标。首先，分别对此三项指标进行二级综合评判，得到评判结果向量 T_1, T_2, T_3 ，据此构成一级评判矩阵 $L=\{T_1, T_2, T_3\}$ 。一级指标的权重集 A_B 同样通过层次分析法(AHP)确定。随后，进行一级综合评判：

$$D = A_B \circ L = (d_1, d_2, K, d_n) \quad (7)$$

最终，依据最大隶属度原则对备选方案进行排序，即综合评判结果向量D中最大分量所对应的电气主接线方案为最优选择。

4 评判示例

以某2×1000MW超超临界燃煤电厂电气主接线为例，综合考虑可靠性、灵活性和经济性三个方面共8项特性指标，对双母线接线、一个半断路器接线、四角形接线三个主接线方案进行多级综合评判算例研究。三个主接线方案示意图如图2所示。

基于以上对主接线方案评价指标体系的分析，可对每一种主接线方案中的各项特性指标进行量化。实际操作中，为便于简化分析，可采用专家打分的方式，如分值区间可取0~5，得分越高代表该项性能越优。示例如表1所示。

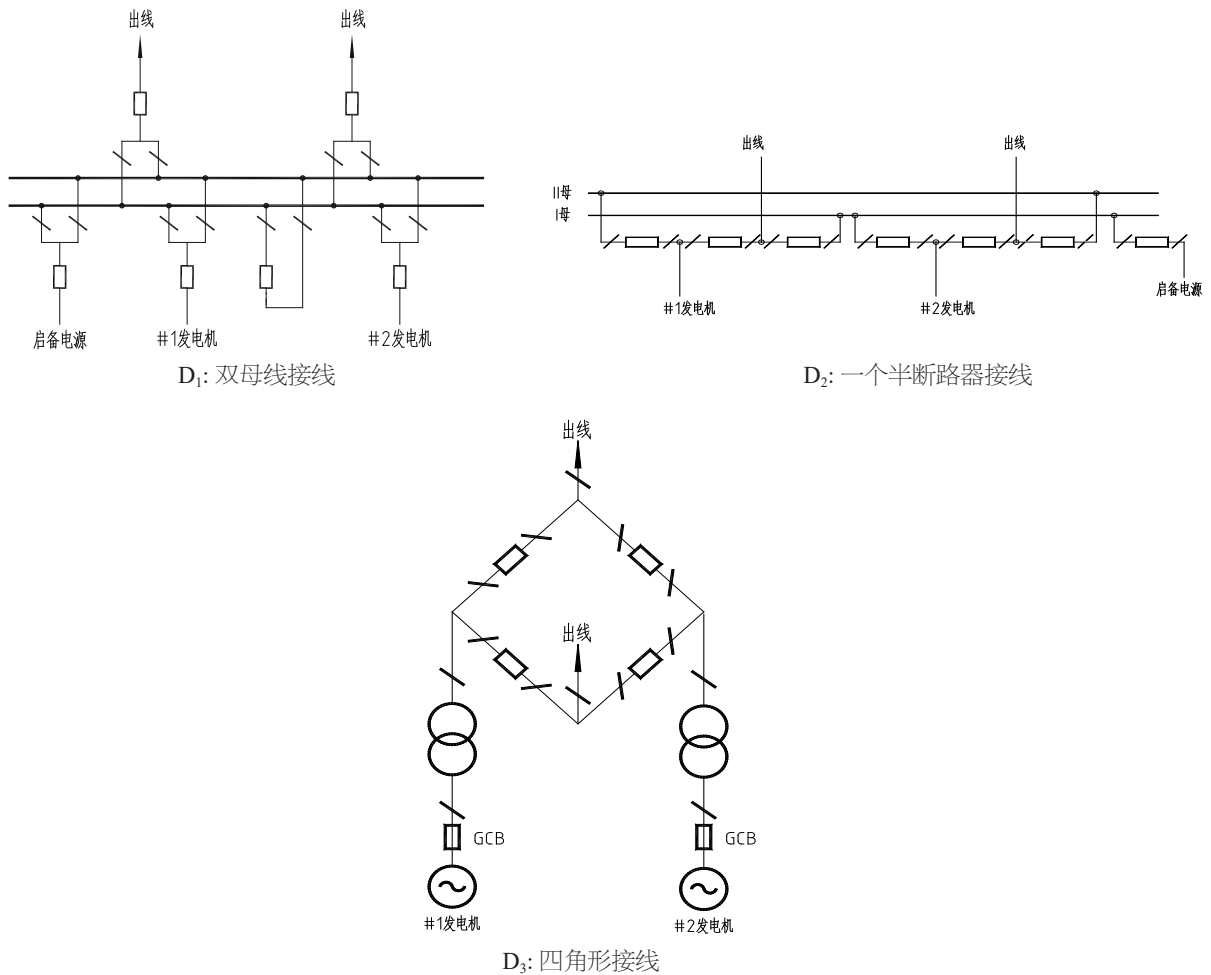


图2 电气主接线比选方案示意图

表1 电气主接线比选特性指标基础量化评价示例

特性指标 主接线方案	元件可靠性 C ₁	事故范围限制 C ₂	母线故障影响 C ₃	调度灵活性 C ₄	检修便捷性 C ₅	扩建灵活性 C ₆	静态投资 C ₇	运行成本 C ₈
双母线方案 D ₁	3	2	2	3	2	3	3	3
一个半方案 D ₂	2	2	3	3	3	3	2	2
四角形方案 D ₃	3	2	1	3	3	1	3	3

4.1 第二级评判矩阵的构建

基于表1所列的元件可靠性 (C₁)、事故范围限制 (C₂) 及母线故障影响 (C₃) 三类特性指标, 构建子目标“可靠性 (B₁)”的评判指标体系。选取各指标在全部方案中的最优值构成最优指标集, 并基于原始数据构建初始评判矩阵。经无量纲化处理后, 得到与 B₁ 对应的标准化数据矩阵 V₁。将 V₁ 中各元素代入式 (2) 计算关联系数, 据此构造与 B₁ 相对应的第二级评判矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0.5 & 1 & 0.333 \end{bmatrix}$$

4.2 确定第二级指标权重集

对指标 C₁ 至 C₃ 采用 1~9 标度法进行两两比较, 构造判断矩阵 P₁, 其形式如下:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

经计算, 判断矩阵 P₁ 的最大特征值对应的一致性指标 CI=0.005, 查表得 3 阶矩阵的随机一致性指标 RI=0.52, 进而由下式计算一致性比率:

$$CR_1 = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{0.52} \approx 0.0096 < 0.1$$

判断矩阵 P_1 通过一致性检验。进一步求解该矩阵的特征向量并归一化,得到指标权重集为 $A_1=(0.54 \ 0.163 \ 0.297)$ 。

4.3 第二级综合评判

同理可得可靠性 B_1 、灵活性 B_2 和经济性 B_3 的综合评判结果:

$$T_1 = (0.85 \ 0.75 \ 0.8)$$

$$T_2 = (0.8 \ 1 \ 0.8667)$$

$$T_3 = (1 \ 0.333 \ 1)$$

4.4 第一级综合评判

利用 T_1, T_2, T_3 构造第一级的评判矩阵 L , 第一级指标权重集 $A_B=(0.625 \ 0.239 \ 0.136)$, 由此求得第一级评判结果为:

$$D = (0.858 \ 0.753 \ 0.843)$$

4.5 评判结果分析

根据最大隶属度原则,由第二级评判结果 T_1, T_2, T_3 可知,从 B_1 可靠性、 B_2 灵活性和 B_3 经济性来看双母线接线方式的评判值最高。从第一级综合评判结果来看,该案例中发电

厂主接线综合评判优劣顺序为 D_1 、 D_3 、 D_2 。

5 结语

本文围绕发电厂电气主接线方案评价问题,建立了系统的评价指标体系。该方法的核心特点在于:其一,以灰色关联系数替代传统隶属度,综合考量了指标的独立与关联影响,确保了整体评价;其二,利用 AHP 法确定权重,将主观经验置于数学检验之下,提升了权重的客观性与可量化水平。研究成果为工程方案的选择提供了一种系统、客观的决策支持工具。

参考文献

- [1] 彭祖赠,孙韞玉.模糊(Fuzzy)数学及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2007.
- [2] 邓聚龙.灰理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [3] 电力工程电气设计手册 电气一次部分[M].水利电力部西北电力设计院编.北京:中国电力出版社,1989.
- [4] IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems[S]. IEEE 493-2007.