

6-1-2020

Optimization for Alternative Schemes of Black Start Power Sources Considering Water Reserve of Hydropower Station

Xueping Gu

1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Wenxuan Liu

1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Jiayu Wang

1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;;

Jinghua Jia

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization for Alternative Schemes of Black Start Power Sources Considering Water Reserve of Hydropower Station

Abstract

Abstract: *An optimization method was proposed to determine alternative schemes of the hydropower black start sources, by considering water reserve constraints. A pumped storage power station was employed to crank some thermal units close to the pumped storage and was with good start-up performance. The restarted thermal units were used as power sources for subsequent restoration instead of the pumped storage units. The reliability of restoring units, the total capacity of selected units and units' node importance in network were defined as objective functions of the optimization problem. The immune algorithm was employed to search for the Pareto optimal solution set of the feasible schemes. The grey correlation model was applied to identify satisfactory solution from the solution set. The effectiveness of the proposed method was validated by simulation results.*

Keywords

power system restoration, black start power source, reservoir storage, alternative power source

Recommended Citation

Gu Xueping, Liu Wenxuan, Wang Jiayu, Jia Jinghua. Optimization for Alternative Schemes of Black Start Power Sources Considering Water Reserve of Hydropower Station[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 170-180.

考虑水电蓄水量的黑启动电源替代方案优化

顾雪平¹, 刘文轩¹, 王佳裕¹, 贾京华²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 河北电力调度通信中心, 河北 石家庄 050021)

摘要: 提出了一种考虑蓄水量约束的黑启动电源替代方案优化方法。利用抽水蓄能电站启动电气距离较近、启动性能较好的火电机组, 在最短时间内实现并网发电, 用成功启动的火电机组代替抽水蓄能机组进行后续恢复。以恢复方案的可靠性最高、额定容量最大以及在网架中的节点重要度最高为目标, 综合考虑约束条件, 建立黑启动电源替代方案优化模型; 采用免疫算法进行求解, 获取方案的 Pareto 最优解集; 采用灰色关联模型进行多属性决策, 在 Pareto 最优解集中选取出最终满意的方案。仿真实验结果验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 电网恢复; 黑启动电源; 水电蓄水量; 电源替代

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 01-0170-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701023

Optimization for Alternative Schemes of Black Start Power Sources Considering Water Reserve of Hydropower Station

Gu Xueping¹, Liu Wenxuan¹, Wang Jiayu¹, Jia Jinghua²

(1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Power Dispatch and Communication Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: An optimization method was proposed to determine alternative schemes of the hydropower black start sources, by considering water reserve constraints. A pumped storage power station was employed to crank some thermal units close to the pumped storage and was with good start-up performance. The restarted thermal units were used as power sources for subsequent restoration instead of the pumped storage units. The reliability of restoring units, the total capacity of selected units and units' node importance in network were defined as objective functions of the optimization problem. The immune algorithm was employed to search for the Pareto optimal solution set of the feasible schemes. The grey correlation model was applied to identify satisfactory solution from the solution set. The effectiveness of the proposed method was validated by simulation results.

Keywords: power system restoration; black start power source; reservoir storage; alternative power source

引言

近年来, 由于气象原因、人为误操作等多种

因素影响^[1-2], 国内外大停电事故时有发生, 引起了社会各界的广泛关注。在分析事故原因、总结经验教训的同时, 作为应对策略的一部分, 事故后的系统恢复工作成为一项研究热点。为此, 国内外许多专家学者进行了卓有成效的研究, 取得了丰硕的研究成果, 主要包括黑启动的总体框架研究、技术校验、方案评估等。文献[3-4]给出了制定黑启动方案需要参照的基本原则和技术问题; 文献[5]通过



收稿日期: 2016-02-22 修回日期: 2016-05-19;
基金项目: 国家自然科学基金(51277076), 中央高校基本科研业务费专项资金(13XS24);
作者简介: 顾雪平(1964-), 男, 石家庄, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用。

<http://www.china-simulation.com>

总结海南电网大停电事故的经验教训, 提出加快电网恢复的措施和建议; 文献[6]通过仿真水电机组为黑启动电源的恢复过程, 对其中可能出现的空载线路充电过电压、发电机自励磁等问题进行了研究; 文献[7]提出一种群决策特征根法, 对通过技术校验的黑启动方案进行了评估; 文献[8]通过建立网架重构数学模型, 分析网架由树状向网状演化的过程, 提出了一种求解线路最佳投入次序的方法; 文献[9]考虑了现代大型水电机组容量大、启动与调节性能强的特点, 提出了以一个黑启动电源同时启动多台被启动机组的扩展黑启动方式, 可以显著加快恢复速度。

大停电发生后, 黑启动电源主要依据各类机组的性能与状态进行选取。由于水电机组启动所需功率小, 爬坡速度快, 通常被认为是理想的黑启动电源。在以往进行的多次黑启动实验中^[10-11], 大多是首先采用水电机组启动其他火电机组, 再逐步进行接力式启动的过程。水电机组的快速启动能力毋庸置疑, 然而大停电发生时的状态并不确定, 蓄水量有时只能维持机组运行较短时间, 成为制约恢复进程的主要因素。以华北地区常见的中小型抽水蓄能电站为例, 决定电站发电量的最重要因素并不是总装机容量, 而是水库蓄水量。目前, 在没有外部系统电源支持的情况下, 较为有效的方案是利用水电机组优先启动电气距离较近、启动性能较好的火电机组, 替代水电机组完成后续恢复工作。因此, 替代电源的选取不仅决定了替代过程能否顺利进行, 而且也将影响后续恢复工作的进展速度。选取替代电源应满足以下几方面要求: ①为确保方案实施过程的顺利进行, 要求待启动机组恢复难度小, 包括恢复该机组的路径充电无功功率尽可能小, 设备操作次数尽量少, 并且该机组恢复所需厂用电尽可能少。②确保为后续恢复提供更强大的功率支持, 替代电源容量应尽可能大, 调节性能尽可能好。③确保负荷恢复速度更快, 替代电源应该距重要负荷最近, 在电网中处于较为有利的位置。

综上所述, 鉴于目前的研究大多是基于黑启动电源持续出力的前提下, 并未考虑水库蓄水量的限制。针对水库蓄水量不足制约水电站持续出力的问题, 本文提出了一种寻找稳定替代电源的方法。以恢复方案的可靠性最高、额定容量最大以及在网架中的节点重要度最高为目标, 制订黑启动电源替代方案; 采用免疫算法进行求解, 获取方案的 Pareto 最优解集; 通过灰色关联模型进行多属性决策分析, 选取出最终满意的优化方案; 最后, 通过 PSCAD 软件仿真最优方案的恢复过程, 验证黑启动电源替代过程的稳定性。

1 黑启动电源替代模型建立

1.1 目标函数

(1) 恢复方案可靠性

在恢复过程中, 被启动机组的投运成功率是决定计划实施成败的关键。文献[12]针对元件投运过程中可能出现的不确定情况, 建立了元件停运率模型, 实现了不同状况下元件停运风险的定量化评估。以多个元件的恢复成功率为基础确定恢复方案的可靠性, 并作为目标函数之一, 如式(1)所示:

$$\begin{cases} \max f_1 = \prod_{i=1}^N r_i R_i(x_i) \\ R_i(x_i) = 1 - \lambda_i(x_i) \\ \lambda_i(x_i) = \lambda_{i1}(x_i) + \lambda_{i2}(x_i) + \lambda_{i3} + \lambda_{i4} \end{cases} \quad (1)$$

其中: N 为电网中元件总数; r_i 为元件 i 是否投入, 投入为 1, 否则为 0; $R_i(x_i)$ 为元件 i 在运行条件 x_i 下的恢复可靠性; $\lambda_i(x_i)$ 为元件 i 在运行条件 x_i 下的停运率, 由 4 部分组成: $\lambda_{i1}(x_i)$ 为元件 i 不正常运行时的停运率; $\lambda_{i2}(x_i)$ 为元件 i 本身故障因素的停运率, 分为两部分: ①运行条件 x_i 在基准值时的故障率 λ_{i20} , ②运行条件 x_i 偏离基准值时的元件停运率增量 $\Delta\lambda_{i2}(x_i)$; λ_{i3} 表示元件 i 在外界环境因素下的停运率; λ_{i4} 表示元件 i 在人为误操作和保护误动作时的停运率。本文取 $\lambda_{i20}=\lambda_{i3}=\lambda_{i4}=0.015$, 元件正常工

作区域及保护整定限值在约束条件中给出, $\lambda_i(x_i)$ 的具体求解方法详见文献[12]。

(2) 恢复机组总容量

以往的事故经验^[5]和多次黑启动实验结果表明^[10-11], 为确保大停电后的系统恢复工作快速平稳进行, 需要引入尽可能多的功率支持。而被启动机组的容量决定了新电源提供功率支持的能力, 合理的机组启动顺序是最终保证更快、更多地恢复负荷, 减小停电损失的根本。同时, 优先启动具有优越性能的机组也是电源替代方案的关键, 不仅可以为后续恢复过程建立良好的基础, 而且性能优越的机组具有较强的进相运行能力, 可以吸收多条恢复路径上的充电无功功率, 并且优良的调节系统能够确保黑启动初期小系统电压与频率的稳定。因此, 将替代电源的总容量作为衡量方案优劣的指标之一, 如式(2)所示:

$$\max f_2 = \sum_{i=1}^{n_A} c_i P_{Mi} \quad (2)$$

其中: n_A 为电网中机组的总台数; c_i 为机组 i 是否启动, 启动为 1, 否则为 0; P_{Mi} 为机组 i 的额定功率。

(3) 机组节点重要度

被启动电源要在投运之后替代原先的水电机组恢复电网其他设备, 因此要尽量确保其在电网中处于有利位置, 且距离重要负荷最近。被启动机组所在节点的重要度如式(3)所示。

$$\begin{cases} \max f_3 = \sum_{i=1}^{n_A} c_i [\mu A_i + (1-\mu) K_i] \\ \text{其中: } A_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{j=1}^{n_A} \alpha_j}, K_i = \frac{P_{i1}}{\sum_{j=1}^{n_A} P_{j1}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: A_i 为机组 i 的拓扑重要度在全部机组重要度中所占比例; K_i 为机组 i 附近的 I 类负荷量在全部机组附近 I 类负荷总量中所占比例; μ 为权重系数, 本文取 $\mu=0.7$; α_i 为机组 i 的拓扑重要度, 按照文献[13]所述方法进行求取, P_{i1} 为机组 i 附近的 I 类负荷量。

综合式(1)~式(3), 替代电源方案多目标优化模

型的求解目标可表示为:

$$\max F = [f_1 \ f_2 \ f_3] \quad (4)$$

1.2 约束条件

(1) 潮流约束

$$\begin{cases} U_j^{\min} \leq U_j \leq U_j^{\max} & j=1, 2, \dots, n_b \\ f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} & i=1, 2, \dots, n_G \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} & i=1, 2, \dots, n_G \\ P_l \leq P_{l\max} & l=1, 2, \dots, n_L \end{cases} \quad (5)$$

式中: n_b 为已恢复系统中的节点总数; U_j 为节点电压; $U_j^{\min}$ 和 $U_j^{\max}$ 分别为节点 j 在正常情况下允许的电压最小和最大值, 本文取 $U_j^{\min}=0.9 \text{ p.u.}$, $U_j^{\max}=1.1 \text{ p.u.}$; $f_{\min}$ 和 $f_{\max}$ 分别为系统在正常情况下允许的频率最小和最大值, 本文取 $f_{\min}=49 \text{ Hz}$, $f_{\max}=51 \text{ Hz}$; n_G 为电网中已恢复机组数; $P_{Gi}^{\min}$ 和 $P_{Gi}^{\max}$ 分别为机组 i 的最小和最大有功出力限制; $Q_{Gi}^{\min}$ 和 $Q_{Gi}^{\max}$ 分别为机组 i 的最小和最大无功出力限制; n_L 为已恢复的线路数, P_l 为线路 l 上流过的有功功率, $P_{l\max}$ 为线路 l 在正常情况下允许输送的最大功率^[14]。

(2) 无功约束与机组自励磁约束

网架重构前期空投线路导致充电无功过剩, 可能引发持续工频过电压。为防止此类情况, 无功约束如式(6)所示。

$$\sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ll} - \sum_{j=1}^{n_k} Q_j(t) < K_1 \sum_{i=1}^{n_G} Q_{Bi, \max}(t) \quad (6)$$

式中: Q_{Ll} 为线路 l ($l=1, 2, \dots, n_L$) 的充电无功功率; n_k 为恢复方案中负荷节点数; $Q_j(t)$ 为节点 j ($j=1, 2, \dots, n_k$) 在 t 时刻所带负荷消耗的无功功率; $Q_{Bi, \max}(t)$ 为机组 i 在 t 时刻所能吸收的最大无功功率; K_1 为无功可靠性系数。

工程实际中, 机组自励磁约束如式(7)所示。

$$\sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ll} - \sum_{j=1}^{n_k} Q_j(t) < \sum_{i=1}^{n_G} K_{CBi} S_{Ni} \quad (7)$$

式中: K_{CBi} 为机组 i 的短路比; S_{Ni} 为机组 i 的额定容量。

结合式(6)~(7), 可得:

$$Q_b = \min(K_1 \sum_{i=1}^{n_G} Q_{Bi, \max}, \sum_{i=1}^{n_G} K_{CBi} S_{Ni}), \text{ 则最终约束可表示为式(8).}$$

$$\sum_{l=1}^{n_L} Q_{Ll} - \sum_{j=1}^{n_k} Q_j(t) < Q_b \quad (8)$$

(3) 水库蓄水量约束

作为黑启动电源, 水电机组的允许用水量可以用最大允许发电量来表示。为保证待启动机组顺利恢复, 其厂用电所需电量不能超过水电机组最大发电量, 待启动机组出力曲线采用如图 1 所示简化模型表示。图 1 将机组 i 的恢复过程主要有两部分组成: 厂用电恢复时间 T_{Si} 和机组理想并网爬坡时间 T_{Ki} , $T_{i,0}$ 为机组 i 获得厂用电的时刻, $T_{i,1}$ 为机组 i 并网自带厂用电时刻, $T_{i,2}$ 为机组 i 按照理想爬坡速度达到额定出力时刻, K_{Pi} 为机组 i 的理想爬坡速率。根据图 1 所示的机组出力曲线, 待启动机组的用电量约束可表示为:

$$K_2 W > \sum_{i=1}^{n_G} \int_{T_{i,0}}^{T_{i,1}} c_i P_{cr,i} dt \quad (9)$$

式中: W 为水电机组可提供的最大发电量, 由水电站水库蓄水量决定; K_2 为发电量可靠性系数; $P_{cr,i}$ 为机组 i 厂用辅机启动所需总功率。

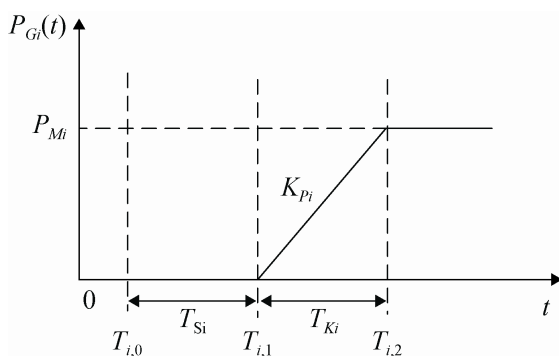


图 1 机组出力简化曲线

Fig.1 Simplified curve of unit output

(4) 电压跌落暂态约束

文献[14]中列出了不同标准下的暂态电压降落要求, 如表 1 所示。

表 1 不同标准下的暂态电压降落要求

Tab.1 Scopes of transient voltage constraint in different standards

标准	暂态低电压限制和持续时间限制
北美电力 可靠委员会	N-1 故障下, 暂态电压<0.8 p.u.的时间不应超过 20 个周波(0.33 s)
中国 国家电网 信息技术 工业协会	暂态电压<0.75 p.u.的时间不应超过 1 s 暂态电压<0.8 p.u.的时间不应超过 0.5 s

(5) 低频保护动作整定值与延时

文献[12]中列出了低频保护动作整定值与延时, 如表 2 所示。

表 2 低频保护动作整定值与延时

Tab.2 Setting and time delay of under frequency protection

f/Hz	保护延时/s	f/Hz	保护延时/s
≤ 47.0	0	47.5~48.0	60
47.0~47.5	10	48.0~49.0	300

2 基于免疫算法的多目标优化求解

免疫算法是在免疫学^[15-16]基础上发展而来的新型智能优化算法, 它利用免疫系统的多样性产生和维持机制来保持种群的多样性, 一定程度上改善了寻优过程中难处理的早熟问题。将求解问题的多目标函数对应于入侵免疫系统的抗原, 将多目标函数的可行解对应于免疫系统产生的抗体, 抗体与抗原间的亲和力描述了可行解与最优解之间的近似程度。采用免疫算法求解此问题, 每个抗体代表一种恢复方案, 根据恢复方案计算目标函数值。以每条线路产生的无功功率作为线路权值, 结合迪克斯特拉算法搜索最短恢复路径, 形成恢复网架。对恢复网架进行潮流校验, 采用罚函数法处理校验超限方案。抗体编码及评价方式, 主要包括以下两方面:

(1) 决策变量编码设计。将待启动机组数量作为抗体长度, 抗体的每位编码代表一个机组的状态, 编码采用二进制, 1 表示此机组恢复, 0 表示不恢复。

(2) 抗体评价方式的确定。采用期望繁殖概率评价抗体的优劣, 主要根据目标函数进行设置。计算步骤如下:

①抗体与抗原间的亲和力

$$\begin{cases} A_v = \sum_{j=1}^m A_{v,j} \\ A_{v,j} = r_{v,j} - M \end{cases} \quad (10)$$

其中： m 为目标函数个数； $r_{v,j}$ 为抗体 v 的目标函数 j 的规范化值，规范化方法如式(11)和(12)所示，其中， n 为抗体群规模； M 为违反约束条件给予的惩罚，若符合约束条件， M 取0，否则 M 取一个较大的正数。由于本文为多目标优化问题，因此取方案各目标亲和力之和表示总体亲和力^[17]。

$$\text{效益型指标 } r_{v,j} = \frac{f_{v,j}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{f_{i,j}\}} \quad (11)$$

$$\text{成本型指标 } r_{v,j} = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} \{f_{i,j}\}}{f_{v,j}} \quad (12)$$

②抗体与抗体间的亲和力

$$S_{v,s} = \frac{k_{v,s}}{L} \quad (13)$$

其中： $k_{v,s}$ 为抗体 v 与抗体 s 中相同的位数； L 为抗体长度。

③抗体浓度

$$C_v = \frac{1}{N} \sum S_{v,s} \quad (14)$$

其中： N 为抗体总数； $S_{v,s} = \begin{cases} 1 & S_{v,s} \geq T \\ 0 & S_{v,s} < T \end{cases}$ ； T 为设定的阈值。

④期望繁殖率

$$P_i = \alpha \frac{A_v}{\sum A_v} + (1 - \alpha) \frac{C_v}{\sum C_v} \quad (15)$$

其中： α 为比例系数， $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

由式(15)可见，抗体的亲和力越高，期望繁殖率越大；浓度越大，期望繁殖率越小，从而保证抗体多样性。采用免疫算法进行优化求解的具体步骤如图2所示。

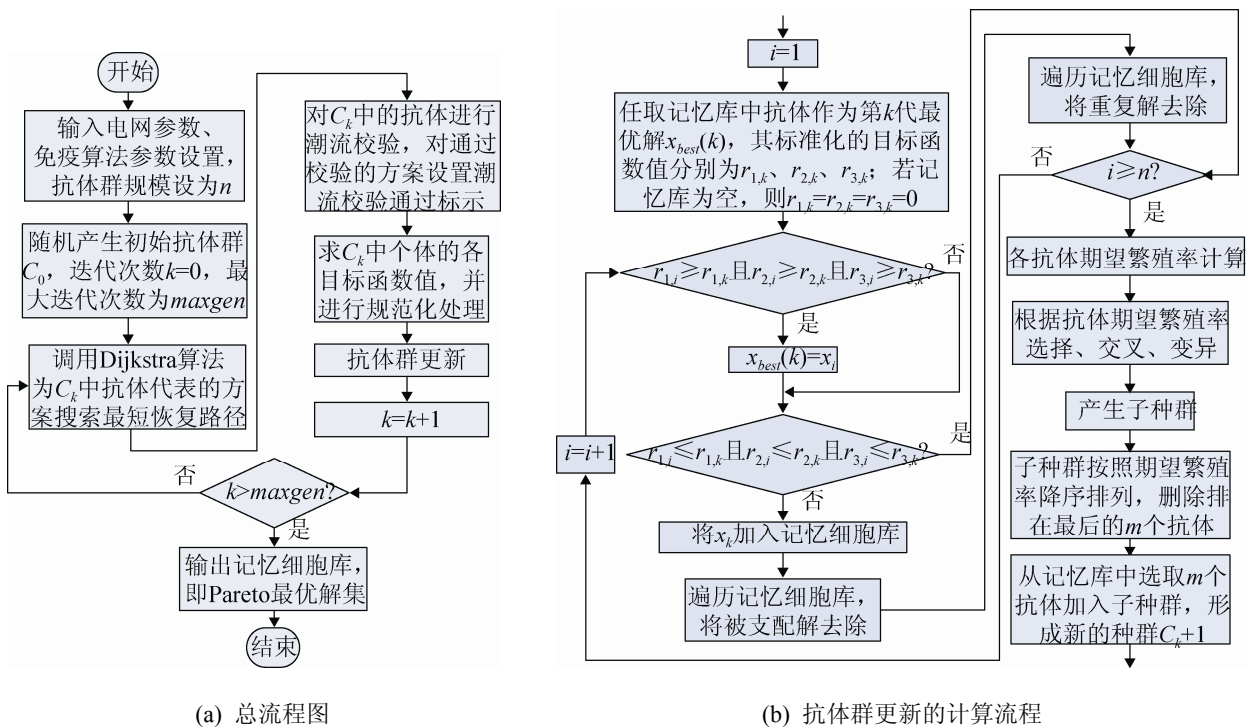


图2 采用免疫算法的求解流程
Fig.2 Flow chart of immune algorithm

3 基于灰色关联模型的多属性决策

采用免疫算法求解多目标优化模型, 获得了方案的 Pareto 最优解集, 还需要根据决策者的偏好和实际客观状况确定最终满意解。本文采用文献[18]提出的模糊熵权法反映决策者主观偏好和客观权重, 结合主客观因素, 求得各目标函数的权重为:

$$\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m\} \quad (16)$$

灰色关联法^[19]是综合灰色系统理论和逼近思想的多属性决策方法, 可以很好地解决实际系统中的灰色多属性决策问题, 且具有较高的决策灵敏度。本文采用灰色关联模型进行多属性决策, 具体决策过程如下。

(1) 构造有 n 个方案 m 个属性的决策矩阵 $F = (f_{ij})_{n \times m}, i \in [1, n], j \in [1, m]$, 经过规范化处理得规范化矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

$$(2) \text{ 设 } r_j^+ = \max\{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}, j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$r_j^- = \min\{r_{ij} \mid 1 \leq i \leq n\}, j = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

则正理想解与负理想解如式(19)和(20)所示。

$$S^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_m^+\} \quad (19)$$

$$S^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_m^-\} \quad (20)$$

(3) 计算方案 i 与正负理想方案关于指标 j 的灰关联系数分别为:

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|}{|r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|} \quad (21)$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}{|r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|} \quad (22)$$

其中: ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般取 $\rho = 0.5$ 。

(4) 计算方案 i 与正负理想方案的关联度分别为:

$$\gamma_i^+ = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^+ \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$\gamma_i^- = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^- \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

γ_i^+ 越大, 表示方案 i 与正理想方案越接近, 方案越佳; γ_i^- 则相反, γ_i^- 越小, 方案越佳。

(5) 定义优属度 u_i 来综合衡量方案 S_i 靠近正理想方案和远离负理想方案的程度。方案 S_i 以优属度 u_i 趋近于正理想方案, 同时以 $1-u_i$ 趋近于负理想方案。根据最小平方和准则, 建立方案 i 的评价函数:

$$\min F(u_i) = [(D_i^+)^2 + (D_i^-)^2] \quad (25)$$

式中: $D_i^+ = u_i \gamma_i^+$, $D_i^- = (1-u_i) \gamma_i^-$ 。令 $\frac{\partial F(u_i)}{\partial u_i} = 0$, 易得:

$$u_i = \frac{(\gamma_i^+)^2}{(\gamma_i^+)^2 + (\gamma_i^-)^2} \quad (26)$$

把优属度 u_i 作为参评不同方案优劣的综合指标, 对其进行降序排序, u_i 值最大的方案即是最优方案。

4 算例

以新英格兰 10 机 39 节点系统为算例验证所提方法的有效性, 系统结构如图 3 所示。假设 33 节点为抽水蓄能电站, 作为黑启动电源, 其装机为 4×50 MW (由于蓄水量有限, 只启动其中的两台机组), 厂用电 5 MW, $\cos \varphi = 0.85$, 启动所需时间 0.5 h, 此时允许用水量大约可发电 150 MWh, 机组空载时所吸收的最大无功功率为 $0.3 S_N$ 。无功可靠性系数 K_1 和发电量可靠性系数 K_2 均取 0.8, $K_{CB} = 0.45$ 。各待启动机组的主要参数假设以及节点参数计算值如表 3 所示。

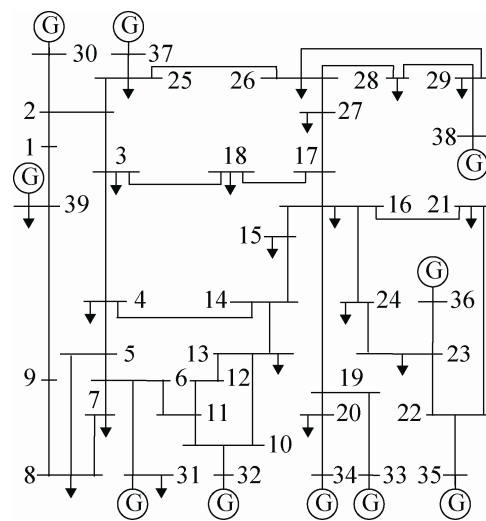


图 3 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.3 New England 10-unit 39-bus power system

表 3 待启动机组参数设置及机组节点参数计算值

Tab.3 Parameters of the units to be restored and unit node parameters calculated value

节点编号	P_G/MW	P_{cr}/MW	T_g/h	K_i	A_i
30	350	35	0.67	0	0.11
31	600	60	0.50	0.018	0.11
32	250	25	0.67	0	0.11
34	300	30	1.10	0.248	0.11
35	250	25	0.83	0	0.11
36	330	33	1.10	0.098	0.11
37	320	32	1.00	0.088	0.11
38	300	30	0.83	0.112	0.11
39	300	30	0.83	0.436	0.12

利用免疫算法对恢复方案进行优化求解,主要参数设置如下:抗体群规模为 50,每个抗体基因位数设为 9(备选替代机组数量为 9,每一个基因位表示一台机组的状态,1 表示此机组恢复,0 表示不恢复),交叉概率取 0.7,变异概率取 0.3,最大迭代次数设为 100,多样性评价参数取 0.95,惩罚因子 M 值取 1,比例系数 α 取 0.5,抗体群淘汰数 m 为 10。随机产生初始种群,按照第 2 节所述方法求解多目标优化问题的 Pareto 最优解集。

免疫算法求得的 Pareto 最优解分布情况如图 4 所示。

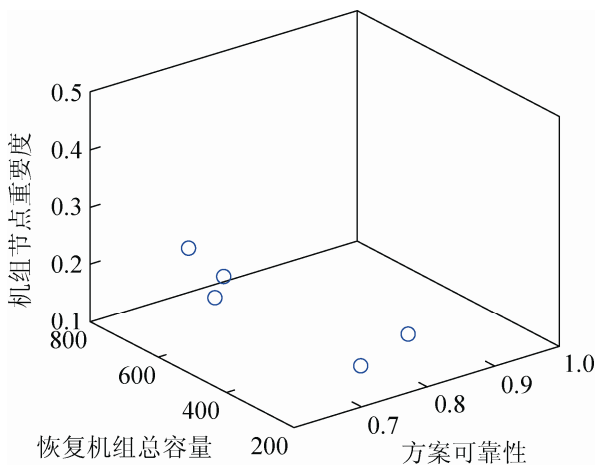


图 4 Pareto 解空间分布情况

Fig.4 Distribution of the Pareto optimal solutions

由 3 位专家根据自身经验赋予 3 个目标函数主观权重,如表 4 所示。

表 4 专家赋予的主客观权重

Tab.4 Subjective weights based on evaluations of experts

专家	f_1	f_2	f_3
1	非常重要	中等	中等
2	重要	重要	不重要
3	重要	中等	不重要

根据式(16)~(26),求出每个方案相对理想方案的优属度,具体求解步骤如附录 A 所示。免疫算法所得优化方案的 Pareto 最优解集及其优属度如表 5 所示。

表 5 各优化方案评分结果

Tab.5 Scoring results of multi-objective optimization schemes

方案编号	恢复机组	f_1	f_2/MW	f_3	优属度 u_i
1	34	0.822 7	300	0.151 4	0.442 0
2	36	0.767 0	330	0.106 4	0.322 5
3	34, 35	0.673 3	550	0.228 4	0.512 5
4	34, 36	0.660 7	630	0.257 8	0.622 0
5	35, 36	0.674 3	580	0.183 4	0.489 3

根据表 5 所示的灰色关联决策评分可知,方案 4 为最优方案。应用 PSCAD 软件对最优方案进行仿真分析,验证恢复过程的稳定性。主要分为 3 部分:电厂辅机启动、火电机组并网和水电机组退出运行。仿真模型如图 5 所示。

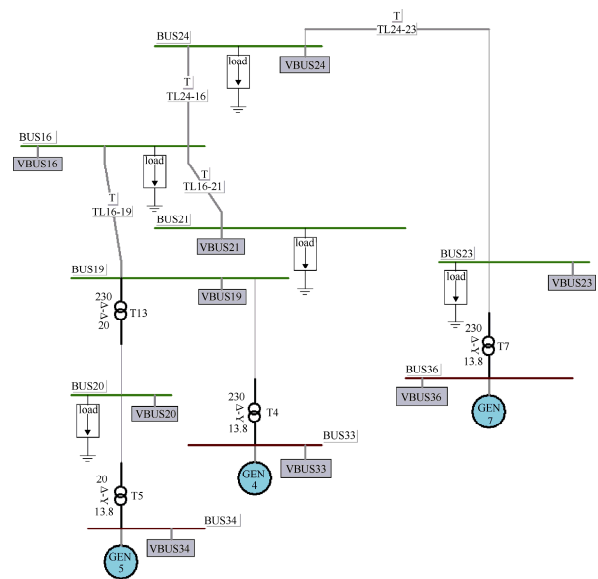


图 5 最优方案 PSCAD 仿真操作界面

Fig.5 Simulation interface of PSCAD for optimal scheme

(1) 电厂辅机启动

大停电后, 水电机组启动, 约 0.5 h 之后并网成功, 相继恢复从节点 33 到节点 34、36 之间的线路与变压器。对此过程进行仿真分析, 水轮机取典型参数模型。本文分别针对辅机同时启动和错时启动两种情况进行仿真分析, 由于节点 19 位于黑启动电源与待启动机组的中间位置, 对其进行监测可以较好把握系统调压措施的效果。辅机同时启动和错时启动时刻节点 19 的电压幅值变化曲线分别如图 6 虚线和实线所示。

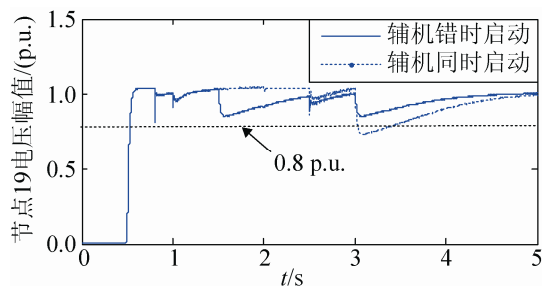


图 6 节点 19 的电压幅值变化曲线
Fig.6 Curve of voltage for node 19

发电厂辅机设备中的一些大功率电动机在启动过程中会造成电压瞬时大幅度下降。由图 6 虚线可知, 辅机同时启动(3 s 时刻)电压幅值跌落较大, 极有可能造成保护装置动作; 而图 6 实线所示的辅机错时启动(在 1.5 s 时启动节点 34 辅机, 3 s 时启动节点 36 辅机), 电压幅值跌落相对较小, 且可以保证电压幅值在 0.8 p.u. 以上。因此, 本文在辅机启动及后续机组并网时均错时进行。

图 7 给出了线路充电、空充变压器、辅机启动过程中的系统频率变化情况。从 0.5 s 开始连续投入变压器支路 33-19, 19-20 和 20-34 以及线路 19-16, 1.8 s, 2.0 s 和 2.5 s 分别投入线路 16-24, 24-23 和变压器支路 23-36, 可见空投大容量变压器可能导致发电机转子一定程度的振荡, 但并不严重。在 1.5 s 和 3.0 s 分别投入节点 34 和节点 36 的辅机, 系统频率出现 0.21 Hz 左右的下降, 然后逐渐恢复。若辅机容量较大, 对系统频率稳定具有一定影响, 则应在保护设置上予以考虑以确保系统可靠恢复。

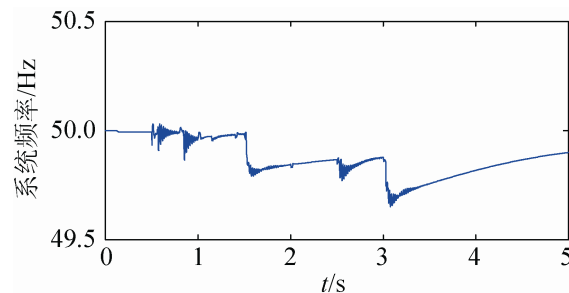
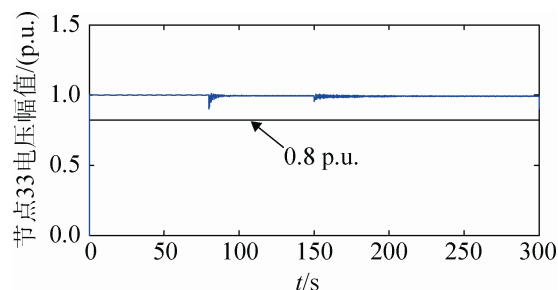


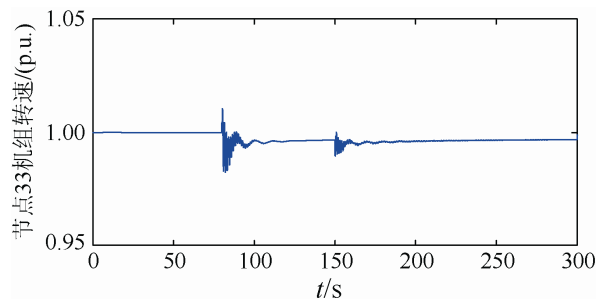
图 7 辅机错时启动过程的频率变化曲线
Fig.7 Frequency response curve of auxiliaries starting up in the different time

(2) 火电机组并网和水电机组退出运行

位于节点 34 和 36 的机组成功启动后与水电机组并网形成一个 3 机小系统, 机组并列操作会对系统造成一定冲击, 主要体现为水火并列时的电压稳定和机组转速稳定; 在新启动的机组并网成功之后, 若水库蓄水量不足以支持水电机组继续运行, 则需要将水电机组退出运行。假设机组 34 与机组 36 分别在 80 s 和 150 s 时与水电机组并列运行, 300 s 时节点 33 水电机组退出运行, 对这一过程进行仿真验证, 所得各电气量变化如图 8(a)~(f) 所示。



(a) 节点 33 的电压幅值变化曲线



(b) 节点 33 机组转速变化曲线

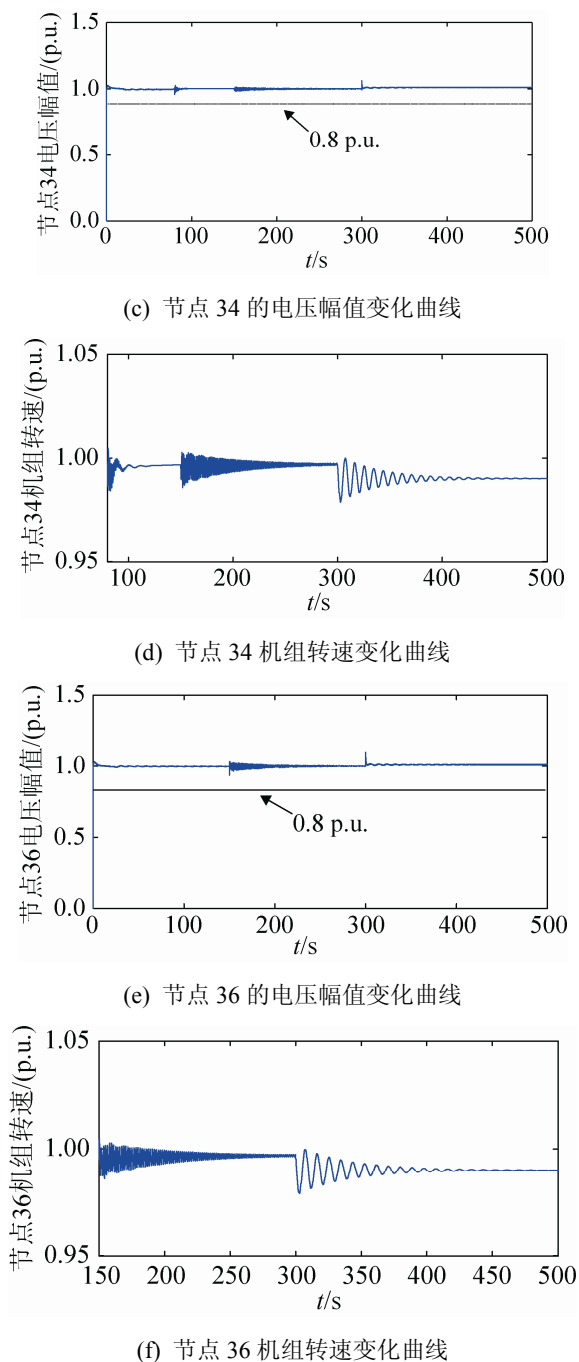


图 8 恢复过程中的各电气量变化曲线

Fig.8 Curves of electrical quantities in recovery process

由各电气量变化曲线可以看出, 节点 33 黑启动电源与节点 34 和节点 36 机组并列过程中, 机端电压和机组转速经历一些波动, 最终仍可以稳定在允许范围内; 并且在节点 33 水电机组退出运行后, 小系统仍可以安全运行。由上述仿真分析可知, 最优方案在辅机启动、机组并网和水电机组退出运行

过程中, 均可以保证稳定运行, 符合约束条件。

5 结论

本文针对水库蓄水量不足制约水电站持续出力的问题, 提出了一种寻找稳定替代电源的方法。以恢复方案的可靠性最高、额定容量最大以及在网架中的节点重要度最高为目标, 制订黑启动电源替代方案; 采用免疫算法进行求解, 获取方案的 Pareto 最优解集; 通过灰色关联模型进行多属性决策分析, 选取出最终满意的优化方案; 最后, 通过 PSCAD 软件仿真最优方案的恢复过程, 验证黑启动电源替代过程的稳定性。以新英格兰 10 机 39 节点系统为算例验证所提方法的有效性。本文提出的方法克服了黑启动方案制定过程中不考虑水电站持续出力限制的缺点, 寻找稳定的替代电源以保证后续恢复方案的顺利实施, 更加客观地反映了大停电后的系统恢复问题, 对提高电力系统恢复方案的可行性有较强的实际应用价值。

参考文献:

- [1] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.(Tang Yong, Bu Guangquan, Yi Jun. Analysis and Lessons of the Blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012 [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.)
- [2] 陈竟成, 黄瀚. 印度大停电事故分析与启示 [J]. 中国电力, 2012, 45(10): 12-16.(Chen Jingcheng, Huang Han. Analysis and Revelation from Blackout Events in India [J]. Electric power, 2012, 45(10): 12-16.)
- [3] Jerry J A. A framework for power system restoration following a major power failure [J]. IEEE Trans. on Power Systems (S0885-8950), 1995, 9(3): 1480-1485.
- [4] Lester H F, Lion K L, Liu C C. From generic restoration to specific restoration strategies [J]. IEEE Trans. on Power Systems (S0885-8950), 1995, 10(2): 745-752.
- [5] 唐斯庆, 张弥, 李建设, 等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-7.(Tang Siqing, Zhang Mi, Li Jianshe, et al. Review of Blackout in Hainan on September 26th-Causes and Recommendations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):1-7.)

- [6] Lindstrom R R. Simulation and field tests of the black start of a large coal-fired generating station utilizing small remote hydro generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0885-8950), 1990, 5(1): 162-168.
- [7] 林振智, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于多属性群决策特征根法的智能电网黑启动决策 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 18-23.(Lin Zhenzhi, Wen Fushuan, Xue Yusheng, et al. Black-start decision-making in smart grids using multi-attribute group eigenvalue method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 18-23.)
- [8] 周云海, 刘映尚, 胡翔勇. 大停电事故后的系统网架恢复 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 32-36.(Zhou Yunhai, Min Yong, Hu Xiangyong. Power system network reconstruction after blackout [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 32-36.)
- [9] 顾雪平, 钟慧荣, 贾京华, 等. 电力系统扩展黑启动方案的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 25-32.(Gu Xueping, Zhong Huirong, Jia Jinghua, et al. Extended black-start schemes of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 25-32.)
- [10] 姚向波. 抽水蓄能电站励磁黑启动逻辑分析 [J]. 水电站机电技术, 2015, 38(11): 25-26.(Yao Xiangbo. Logic analysis of excitation black start for pumped-storage power station [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2015, 38 (11): 25-26.)
- [11] 汪卫平, 吴培枝. 琅琊山抽水蓄能电站机组黑启动试验分析 [J]. 水电自动化与大坝监测, 2014, 38(5): 58-59, 77.(Wang Weiping, Wu Peizhi. Analysis of unit black start test at Langyashan Pumped-storage power plant [J]. Hydropower automation and dam monitoring, 2014, 38(5): 58-59, 77.)
- [12] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与停运率建模 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 6-11.(Liu Haitao, Cheng Lin, Sun Yuanzhang, et al. Outage Factors Analysis and Outage Rate Model of Components Based on Operating Conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 6-11.)
- [13] 刘艳, 顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.(Liu Yan, Gu Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.)
- [14] 刘玉田, 王洪涛, 叶华. 电力系统恢复理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.(Liu Yutian, Wang Hongtao, Ye Hua. Power System Restoration Theory and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2014.)
- [15] 龙著乾, 崔顺天. 免疫算法关键技术与优化研究 [J]. 软件导刊, 2015, 14(11): 51-53.(Long Zhuqian, Cui Shuntian. Research on key technology and optimization of immune algorithm [J]. Software Guide, 2015, 14(11): 51-53.)
- [16] 舒万能. 人工免疫算法的优化及其关键问题研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.(Shu Wanneng. Artificial immune algorithm optimization and its key problems research [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.)
- [17] 熊虎岗, 程浩忠, 李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 102-108.(Xiong Hugang, Cheng Haozhong, Li Hongzhong. Multi-objective reactive power optimization based on immune algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 102-108.)
- [18] 陈亮, 顾雪平, 贾京华. 考虑后续恢复影响的扩展黑启动方案多目标优化与决策 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 137-143.(Chen Liang, Gu Xueping, Jia Jinghua. Multi-objective optimization and decision making of extended black-start scheme considering subsequent restoration influence [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 137-143.)
- [19] 党耀国, 刘思峰, 王正新, 等. 灰色预测与决策模型研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.(Dang Yaoguo, Liu Sifeng, Wang Zhengxin, et al. Research on Gray Forecast and Decision Model [M]. Beijing: Science Press, 2009.)

附录 A 运用灰关联度模型进行多属性决策分析

根据表 5 所示的 Pareto 最优解集, 运用灰色关联模型进行多属性决策分析, 具体步骤如下:

(1) 构造决策矩阵:

f_1	f_2/MW	f_3	f_1	f_2/MW	f_3
0.8227	300	0.1514	0.6607	630	0.2578
0.7670	330	0.1064	0.6743	580	0.1834
0.6733	550	0.2284			

对其进行规范化处理, 得:

f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
1	0.4762	0.5873	0.8031	1	1
0.9323	0.5238	0.4127	0.8196	0.9206	0.7114
0.8184	0.8730	0.8860			

(2) 根据专家经验求取主观权重:

由表 4 可知, 代表专家意见的三角模糊数为:

专家	f_1	f_2	f_3
1	[0.7 0.9 1]	[0.3 0.5 0.7]	[0.3 0.5 0.7]
2	[0.5 0.7 0.9]	[0.5 0.7 0.9]	[0.1 0.3 0.5]
3	[0.5 0.7 0.9]	[0.3 0.5 0.7]	[0.1 0.3 0.5]

主观权重为: $p_1=0.447\ 4$, $p_2=0.335\ 5$, $p_3=0.217\ 1$ 。

(3) 基于信息熵权的客观权重求取:

$$q = \begin{bmatrix} 0.484\ 6 & 0.230\ 8 & 0.284\ 6 \\ 0.498\ 9 & 0.280\ 3 & 0.220\ 8 \\ 0.317\ 5 & 0.338\ 7 & 0.343\ 7 \\ 0.286\ 5 & 0.356\ 7 & 0.356\ 7 \\ 0.334\ 3 & 0.375\ 5 & 0.290\ 2 \end{bmatrix}$$

$$H_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n q_{ij} \ln q_{ij}, \quad H_1=0.333\ 4, \quad H_2=0.334\ 8,$$

$$H_3=0.326\ 8。$$

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^m (1-H_j)}, \quad w_1=0.332\ 4, \quad w_2=0.331\ 8, \quad w_3=0.335\ 8。$$

(4) 模糊熵权求取:

$$\omega_1 = \frac{p_1 w_1}{\sum_{j=1}^m p_j w_j} = 0.446\ 7,$$

$$\omega_2 = \frac{p_2 w_2}{\sum_{j=1}^m p_j w_j} = 0.334\ 3,$$

$$\omega_3 = \frac{p_3 w_3}{\sum_{j=1}^m p_j w_j} = 0.219\ 0。$$

(5) 求取正理想解与负理想解:

$$r_1^+ = 1, \quad r_2^+ = 1, \quad r_3^+ = 1$$

$$r_1^- = 0.803\ 1, \quad r_2^- = 0.476\ 2, \quad r_3^- = 0.412\ 7$$

$$S^+ = \{1, 1, 1\}$$

$$S^- = \{0.803\ 1, 0.476\ 2, 0.412\ 7\}$$

(6) 计算方案 i 与正负理想方案关于指标 j 的灰关联系数分别为:

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|}{|r_{ij} - r_j^+| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^+|},$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}{|r_{ij} - r_j^-| + \rho \max_i \max_j |r_{ij} - r_j^-|}$$

$$\xi^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0.359\ 2 & 0.415\ 7 \\ 0.812\ 6 & 0.381\ 4 & 0.333\ 3 \\ 0.617\ 9 & 0.698\ 1 & 0.720\ 3 \\ 0.598\ 6 & 1 & 1 \\ 0.619\ 5 & 0.787\ 2 & 0.504\ 3 \end{bmatrix},$$

$$\xi^- = \begin{bmatrix} 0.598\ 6 & 1 & 0.627\ 2 \\ 0.694\ 4 & 0.860\ 5 & 1 \\ 0.950\ 4 & 0.425\ 3 & 0.382\ 9 \\ 1 & 0.359\ 2 & 0.333\ 3 \\ 0.946\ 7 & 0.397\ 8 & 0.495\ 7 \end{bmatrix}$$

(7) 计算方案 i 与正负理想方案的灰关联度分别为:

$$\gamma_i^+ = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^+, \quad \gamma_i^- = \sum_{j=1}^m \omega_j \xi_{ij}^-$$

$$\gamma^+ = [0.657\ 8 \quad 0.563\ 5 \quad 0.667\ 1 \quad 0.820\ 7 \quad 0.650\ 3]$$

$$\gamma^- = [0.739\ 1 \quad 0.816\ 8 \quad 0.650\ 6 \quad 0.639\ 8 \quad 0.664\ 5]$$

(8) 计算方案 i 的优属度:

$$u_i = \frac{(\gamma_i^+)^2}{(\gamma_i^+)^2 + (\gamma_i^-)^2},$$

$$u = [0.442\ 0 \quad 0.322\ 5 \quad 0.512\ 5 \quad 0.622\ 0 \quad 0.489\ 3]。$$

(上接第 169 页)

FMAC 控制器结构如图 2 所示, 其中各 PI 控制参数如下:

$$K_{Pv}=4.5, \quad K_{H}=0.4, \quad K_{Pm}=1.6, \quad K_{Im}=0; \quad K_{Pp}=0.18, \quad K_{Ip}=0.01,$$

$$K_{Pa}=5.6, \quad K_{Ia}=0.05$$

$$g_v(s) = \frac{(0.024s+1)(0.035s+1)}{(0.004s+1)(0.05s+1)}, \quad g_m(s) = \frac{(0.008s+1)}{(0.004s+1)},$$

$$g_a(s) = \frac{1}{0.667s+1}; \quad \text{CPSS}_{\text{DFIG}}: \quad G_{\text{CPSS}}(s) = \frac{0.4}{(0.06s+1)^2},$$

$$u_{\text{pss_max}}=0.4, \quad u_{\text{pss_min}}=-0.4。$$

以上各控制器参数均经过全工况范围内校验, 以保证其控制效果。

A4. 电网参数

变压器(T1,T2)

$$V1=230\ \text{kV}, \quad R1=5.878 \times 10^{-5}\ \Omega, \quad L1=0.024\ \text{H},$$

$$V2=10.5\ \text{kV}, \quad R2=4.444 \times 10^{-7}\ \Omega, \quad L2=0\ \text{H}$$

$$R_m=222.22\ \Omega, \quad L_m=0.59\ \text{H}$$

变压器(T2')

$$V1=230\ \text{kV}, \quad R1=3.674\ \Omega, \quad L1=0.292\ \text{H}, \quad V2=575\ \text{V},$$

$$R2=6.89 \times 10^{-5}\ \Omega, \quad L2=5.482 \times 10^{-6}\ \text{H},$$

$$R_m=2.204 \times 10^6\ \Omega, \quad L_m=\infty。$$

输电线

$$\text{正序和零序电阻}(\Omega/\text{km}): 0.053, 1.61$$

$$\text{正序和零序电感}(\text{H}/\text{km}): 0.0014, 3.32 \times 10^{-3}$$

$$\text{正序和零序电容}(\text{C}/\text{km}): 11.33 \times 10^{-9}, 5.01 \times 10^{-9}$$

$$L1-1 \text{ 和 } L1-2: 10\ \text{km}; \quad L2: 30\ \text{km}; \quad L3-1 \text{ 和 } L3-2: 50\ \text{km}。$$

仿真中所用基准频率 f_n 为 60 Hz。