

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180686

## 考虑燃煤机组健康度与负荷转移的连锁故障防控策略

林玥廷<sup>1</sup>, 张维奇<sup>1</sup>, 林英明<sup>1</sup>, 丁伟<sup>2</sup>, 吴名新<sup>2</sup>, 汤俊<sup>2</sup>, 张家美<sup>2</sup>, 蒋沁<sup>2</sup>

(1. 广东电网公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 湖南大唐先一科技有限公司, 湖南 长沙 410007)

**摘要:** 随着能源互联网的发展, 大规模间歇性新能源并网为电网运行带来挑战, 增加了火电的调峰压力, 对燃煤机组运行要求也越来越高。设计了对燃煤机组运行状态进行衡量的机组健康度指标, 并在此基础上提出了基于发电机侧的结合预防和阻断的连锁故障防控策略。首先, 提出用于评估燃煤机组运行状态的机组健康度指标。基于该指标构建协调系统风险和调度成本的多目标规划模型, 采用 NSGA-II 算法计算多目标模型下机组健康度阈值的 Pareto 前沿, 再通过熵权决策法对解集进行评估确定最优阈值。其次, 通过比较机组健康度与最优健康度阈值, 判断预防阶段或阻断阶段的燃煤机组是否符合负荷转移条件。最后, 提出基于燃煤机组健康度的预防控制和阻断控制两种控制策略下的机组负荷调整方案, 并以 IEEE39 系统作为算例进行仿真验证。结果表明, 该控制策略能有效地实现电网安全可靠地调度, 规避连锁故障的发生。

**关键词:** 燃煤机组; 连锁故障; 健康度; 预防控制; 阻断控制

### Control strategy of cascading failures considering the health degree of coal-fired units and load transfer

LIN Yueying<sup>1</sup>, ZHANG Weiqi<sup>1</sup>, LIN Yingming<sup>1</sup>, DING Wei<sup>2</sup>, WU Mingxin<sup>2</sup>, TANG Jun<sup>2</sup>, ZHANG Jiamei<sup>2</sup>, JIANG Qin<sup>2</sup>

(1. Electric Power Dispatching Control Center of GPGC, Guangzhou 510600, China;

2. Datang Xianyi Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China)

**Abstract:** With the development of energy internet, large-scale intermittent renewable power integration brings challenge to operation of power grid, which increases the pressure of thermal power peak shaving and requirements for the operation of coal-fired units are getting higher. In this paper, the health degree of the unit for measuring the operating status of coal-fired units is designed, and a prevention and control strategy based on generator side to prevent and block cascading failures is proposed. Firstly, the health degree for evaluating the operating status of coal-fired units is proposed, and a multi-objective planning model for coordinating system risk and dispatch cost based on this index is constructed. The Pareto solution of the health threshold under multi-objective model is calculated by NSGA-II algorithm to get the Pareto frontier and then evaluate the solution set by entropy weight decision method to determine the optimal threshold. Secondly, by comparing the health of the unit with the optimal health threshold, it is determined whether the coal-fired units in the prevention or blocking phase can meet the load transfer conditions. Finally, generators dispatching adjustment schemes under strategies of preventive control and interdict control are put forward respectively based on health degree. The IEEE39 system is used as an example to verify the simulation. The results show that the control strategy can effectively realize the safe and reliable dispatching of the grid and avoid the occurrence of cascading failures.

This work is supported by Distinguished Youth Fund of Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ1011).

**Key words:** coal-fired unit; cascading failure; health degree; preventive control; interdict control

## 0 引言

近年来, 随着环境污染与化石能源等问题的日

趋严重, 以及新能源技术与互联网技术的迅猛发展, 能源互联网的诞生有效地引导传统电力系统向新能源电力系统转型, 推动能源领域的新一轮变革<sup>[1-2]</sup>。建设坚强的智能电网是构建能源互联网的关键, 大电网对连锁故障防御能力需得到全面提升以保障能

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年基金(2017JJ1011)

源互联网安全、可靠地运行<sup>[3-5]</sup>。

电力系统是一个庞大而复杂的非线性系统，系统中某一元件的故障都可能会改变潮流平衡从而引发连锁性故障反应，严重时会导致电网大面积的崩溃<sup>[6-8]</sup>。其中，发电机组作为电力系统的源头，一旦发生故障，电力系统将面临巨大的功率缺额，对系统造成巨大的冲击，甚至会造成难以估量的社会经济损失。新能源大规模并网后会增大负荷用电峰谷差，需要火电机组提供辅助服务，而目前我国能源结构特点决定煤电在深度调峰中扮演重要角色<sup>[9-10]</sup>。因此，从发电侧预防和控制连锁故障的发生是提升电力系统运行安全性与稳定性的关键，对提高燃煤机组的调峰能力、消纳更多可再生能源具有重要意义。

迄今为止，国内外科研人员针对连锁故障已进行大量研究。文献[11]提出一种基于马尔可夫过程的电力系统连锁故障解析模型及概率计算方法。在区分系统不同元件物理特性的同时，根据系统元件所在电力系统状态信息分析出元件停运概率。这些方法是从不确定性或概率性角度对连锁故障的发生、发展进行分析，辨识出系统的薄弱环节，降低连锁故障发生的风险。利用复杂网络理论对电力系统这一典型的复杂网络系统进行分析也受到普遍关注。文献[12]基于复杂网络理论，从电网拓扑结构出发，提出一种大规模电网结构脆弱性分析方法。文献[13]从复杂网络理论角度评述了已有电网连锁故障模型，分析了预防和控制连锁故障的几种可行方法，并指出多智能体系统可能是一条控制故障传播的有效途径。文献[14]则从复杂网络、自组织临界性和电力/信息耦合网络三个角度研究电力连锁故障的传播机理及其对电力系统可靠性的影响。此外，还有不少研究以复杂系统理论为核心，文献[15]基于复杂系统脆性理论提出了一种连锁故障脆性源辨识模型，用潮流熵来衡量电网所处的状态，通过脆性关联及熵增分别从元件和宏观上阐述连锁故障的传播机理。文献[16]综合考虑了网络中各节点在网络连通性和功率传输性中的重要性，使用熵值法，提出了综合功率介数的概念，对网络中的脆弱节点进行了识别及季节性分析。

上述方法有效地揭示了电力系统连锁故障的传播机理，更多侧重于线路与负荷，从发电端着手预防与控制的研究较少。因此，本文设计机组健康度指标对燃煤机组的运行状态进行衡量，并基于该指标提出从发电机组侧预防和阻断连锁故障发生的控制策略，在降低调度成本与系统风险的情况下实现燃煤机组安全可靠的功率调整。

## 1 机组健康度评价方法

### 1.1 机组健康度评价

燃煤机组机构复杂，机组从正常运行到故障，往往有一个复杂的发展过程，正常发电与机组故障之间存在着一种亚健康运行模式<sup>[17]</sup>。基于设备运行监测参数的在线评估体系能够实时反映机组运行状态，多应用于燃煤机组、风电机组和变电站等对象的故障诊断、维修决策<sup>[18]</sup>。本文通过对燃煤机组设备状态进行实时监测，并引入一个用来表征机组健康状态、处于区间[0, 1]的确定值，即机组健康度，及时了解机组的健康状态，并在此基础上对燃煤机组进行调度控制。根据可靠性理论，可以用劣化度表示参数或设备偏离正常状态的程度<sup>[19]</sup>，记为  $D$ ，其取值范围为[0,1]。

任何一种设备都具有一系列的状态参数  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ，且它们是时间的函数，可写成  $X(t)$ 。设备的功能可认为是  $n$  个参数所确定的正常工作状态的集合  $G(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ；相反，故障或失效是  $X(t)$  超过正常工作状态的集合界限。而正常工作中的设备状态是在一定程度上偏离了良好状态，但未超过极限技术状态的界限，是个中间状态。因此，劣化度可定义为设备状态偏离了良好状态向极限技术状态发展的程度，根据设备劣化度可算得燃煤机组的劣化度为

$$L_i = \sum_{z=1}^K w_z \cdot D_z \quad (1)$$

式中： $L_i$  为机组  $i$  的劣化度； $w_z$  为设备或系统  $z$  的权重； $D_z$  为设备或系统  $z$  的劣化度； $K$  为机组  $i$  所含设备或系统的个数。

设备的劣化度采用的是相对劣化度，是指设备当前实际状态和故障状态相比的劣化程度，记为  $D_z$ ，其取值范围为[0, 1]。当值为 1 时，表明设备处于故障状态；当值为 0 时，表明设备处于健康状态。根据设备各参数自身特点，可以采用以下 3 种方法确定其劣化度。

1) 对于可以用状态检测参数和性能参数来反映设备状态的情况，其劣化度计算方法如下：对于停运参数为一上限的特征参数，其劣化度可按式(2)计算<sup>[20]</sup>。

$$D_z = \left[ \frac{(x_z - x_0)}{(x_{\max} - x_0)} \right]^q \quad (x_0 \leq x_z \leq x_{\max}) \quad (2)$$

式中： $x_0$  表示该设备特征参数正常值； $x_{\max}$  表示该设备需停运时的状态参数阈值； $x_z$  表示该设备特征参数的实际测量值； $q$  的取值大小反映了该特征参数与该设备健康状况的关系。一般情况下，取  $q$  值

为 1, 表明状态与劣化值之间呈线性关系, 即劣化值越大, 健康状态越差。

对于停运参数为一下限的特征参数, 其劣化度可按式(3)计算。

$$D_z = \left[ (x_0 - x_z) / (x_0 - x_{\min}) \right]^q \quad (x_{\min} \leq x_z \leq x_0) \quad (3)$$

式中:  $x_0$  表示该设备特征参数正常值;  $x_{\min}$  表示该设备停运时的特征参数阈值;  $x_z$  表示该设备特征参数的实际测量值,  $q$  与式(2)意义相同。

$$D_z = \begin{cases} 1, & x_z \leq x_0 \\ \left| (x_z - x_1) / (x_0 - x_1) \right|^q, & x_0 < x_z < x_1 \\ 0, & x_1 \leq x_z \leq x_2 \\ \left| (x_z - x_2) / (x_3 - x_2) \right|^q, & x_2 < x_z < x_3 \\ 1, & x_z \geq x_3 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_1$ 、 $x_2$  为设备特征参数正常值下限和上限;  $x_0$ 、 $x_3$  为设备必须停运时特征参数的下限和上限;  $q$  与式(2)相同。

2) 对于难以检测、但可得到故障间隔统计值的情况, 劣化度可按式(5)计算, 即

$$D_k = (t/T)^q \quad (5)$$

式中:  $t$  为系统从启用(或更换)起已运行的时间;  $T$  为系统允许的运行时间(根据 MTBF 确定);  $q$  与式(2)相同。

3) 对于无法进行状态检测、且没有故障间隔统计值的情况, 其劣化度可由维修人员、检测人员和使用人员打分估计。

$$D_z = a \cdot w_1 + b \cdot w_2 + c \cdot w_3 \quad (6)$$

机组  $i$  的健康度为

$$H_i = (1 - L_i) \times 100\% \quad (7)$$

式中,  $H_i$  为机组  $i$  的健康度。

## 1.2 机组健康度阈值

机组健康度为区间[0,1]间的确定值。当健康度的值趋近于 1 时, 认定机组处于良好状态, 能够继续稳定运行; 接近或达到 0 时, 则认定机组处于极限状态, 需要立即转移负荷至其他机组, 甚至断开故障机组。它是一个衡量该机组是否需要进行负荷转移的主要依据。如果阈值定的较大, 则机组将会面临频繁调度, 调度成本较高; 如果此值定的较低, 则系统无法察觉到所有存在健康隐患的机组, 潜在的系统风险较大。因此本文通过构建调度成本函数和风险函数的双目标函数模型, 对最优健康度阈值进行求解。

以机组健康度阈值为自变量, 计算在整个控制周期内, 系统的调度成本。取健康度低于健康度阈

值的机组, 考虑其他机组的健康度与发电能力上限, 将其上的负荷进行转移。

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T v \cdot |P_{ij} - P_{i(j-1)}| \cdot X_{ij} \quad (8)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 0, & H_{ij} > H_0 \\ 1, & H_{ij} \leq H_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $C$  为发电厂中  $N$  台机组在总时间  $T$  内的调度费用;  $v$  为调节单位功率时的成本;  $P_{ij}$  为电厂中第  $i$  台机组在第  $j$  个控制周期内的输出功率;  $P_{i(j-1)}$  为电厂中第  $i$  台机组在第  $j-1$  个控制周期内的输出功率;  $X_{ij}$  为第  $i$  台机组在第  $j$  个控制周期内是否参与调度, 参与为 1, 不参与为 0;  $H_{ij}$  为电厂中第  $i$  台机组在第  $j$  个控制周期内的健康度;  $H_0$  为机组进行调节的健康度阈值。

其中风险函数为<sup>[21]</sup>

$$R = \sum_{i=1}^G O_i \cdot S_i \quad (10)$$

式中:  $R$  为机组故障造成的系统风险;  $G$  为系统中的机组总台数;  $O_i$  为第  $i$  台机组发生故障的概率;  $S_i$  为第  $i$  台机组故障时的后果, 包括机组故障成本及电网失负荷停电成本。

其中, 机组故障概率  $O_i$  与机组健康度  $H$  之间的函数关系, 可使用燃煤机组故障次数与机组健康度的历史数据拟合得到, 如式(11)。

$$O_i = 1 - H_0 e^{-\sqrt{1-H_i}} \quad (11)$$

式中:  $T_i$  为第  $i$  台机组的故障率;  $H_i$  为第  $i$  台机组的健康度;  $e$  为自然常数。

第  $i$  台机组的故障后果  $S_i$  为

$$S_i = Q_i^{\text{cost}} + m_i^{\text{cost}} \cdot \Delta L_i \quad (12)$$

式中:  $Q_i^{\text{cost}}$  为机组  $i$  故障的维修成本;  $m_i^{\text{cost}}$  为单位失负荷成本;  $\Delta L_i$  为机组  $i$  故障造成的失负荷。

建立多目标函数进行求解:

$$\begin{cases} \min R = \sum_{i=1}^G O_i \cdot S_i \\ \min C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T v \cdot |P_{ij} - P_{i(j-1)}| \cdot X_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

优化模型同时需要满足系统有功平衡约束、发电机发电能力约束和线路容量约束, 如式(14)一式(16)所示。

$$\sum_{i \in G} P_{i,g} = \sum_{k \in F} P_{k,\text{load}} \quad (14)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (15)$$

$$|l_{ik}| \leq l_{ik,max} \quad (16)$$

式中:  $P_{i,g}$  为机组  $i$  的输出功率;  $P_{load,k}$  为负载  $k$  的功率;  $G$ 、 $F$  分别为发电机、负荷的集合;  $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$  分别为发电机的最大输出功率和最小输出功率;  $l_{ik}$  为线路输电容量;  $l_{ik,max}$  为线路输电容量最大值。

## 2 燃煤机组出力调整策略

### 2.1 燃煤机组预防阶段出力调整策略

针对各机组健康度, 需进行机组出力调整, 使系统风险降到最低。对于健康度低于阈值的机组, 机组功率调整量为机组全部所带负荷, 对于健康度大于健康度阈值的机组, 以机组功率调整量为控制变量、机组健康度与机组总功率的乘积为因变量构造函数求解各机组功率增量。

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i & H_i < H_0 (i \in G^*) \\ \max \sum_{i \in G} H_i \cdot (P_{i,before} + \Delta P_i) & H_i > H_0 (i \in G) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Delta P$  为各机组的功率调整量;  $G^*$ 、 $G$  分别为健康度低于阈值和高于阈值的机组的集合;  $H$  为机组的健康度;  $H_0$  为健康度阈值;  $P_{i,before}$  为进行功率调整前机组  $i$  的输出功率。

其中为保持系统功率平衡, 各机组升降功率之和应相等, 同时各机组的功率调整量应在机组出力范围之内, 即

$$\sum_{i \in G} \Delta P_i = \sum_{i \in G^*} \Delta P_i \quad (18)$$

式中:  $\Delta P_i$  为机组  $i$  的功率调整量;  $P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}$ ,  $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$  分别为发电机的最大输出功率和最小输出功率。

### 2.2 燃煤机组阻断阶段出力调整策略

网络中某些节点的故障会导致其他节点的过负荷, 进而造成连锁故障。为避免连锁故障的发生, 控制故障的影响范围, 需设计出燃煤机组阻断阶段的出力调整策略。连锁故障的阻断控制首先需要找到控制节点, 网络中节点众多, 但是能有效降低系统发生连锁故障的节点并不多, 因此首先需要找到这些需要进行控制的重要节点。大电网符合复杂网络的性质, 因而具有复杂网络的特点。使用复杂网络理论, 通过介数的概念可找出网络中的关键节点。然后以此节点为目标节点进行潮流追踪, 获取各发电机对该节点的功率贡献份额。

$$p_{Gi \rightarrow a-l} = \frac{p_{a-l}}{p_a} [A_u]_{ai}^{-1} p_{Gi} \quad (19)$$

$$[A_u]_{ai} = \begin{cases} 1 & a = i \\ -c_{ai} = -|p_{i-a}| / p_i & i \in a^{(u)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $p_{Gi \rightarrow a-l}$  为发电机  $i$  向线路  $a-l$  提供的功率;  $p_{a-l}$  为流入线路  $a-l$  的功率;  $p_a$  为流入节点  $a$  的功率;  $A_u$  为发电机  $i$  对于节点  $a$  的潮流分配矩阵;  $p_{Gi}$  为发电机  $i$  的实际出力;  $a^{(u)}$  表示节点  $a$  的潮流进线集。

故障发生时, 计算出各发电机对该线路的潮流利用份额, 确定需进行调整的发电机及功率调整量, 从而从发电机端阻断连锁故障的发生。

## 3 燃煤机组出力调整流程

燃煤机组连锁故障的控制流程如图 1 所示, 主要分为预防控制策略和阻断控制策略。

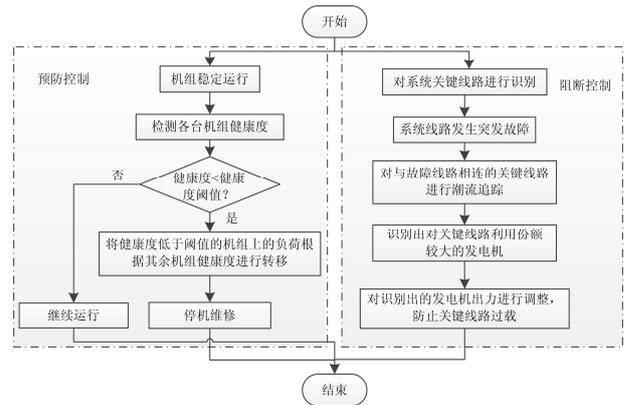


图 1 燃煤机组连锁故障控制策略流程图

Fig. 1 Flow chart of control strategy of cascading failures in coal-fired units

- 1) 在机组发生故障前, 实时预防控制策略, 对机组的健康状况进行监测;
- 2) 一旦发现机组运行风险较大, 有机组处于健康度低于健康度阈值的情况, 则提前将该机组上的负荷按健康度由高到底的顺序转移至其余机组;
- 3) 对系统中可能触发连锁故障的关键节点进行识别;
- 4) 一旦系统中的节点发生故障, 及时对系统中的关键节点的潮流进行监测, 并获取各发电机对该节点的贡献率;
- 5) 在满足潮流约束的条件下, 对贡献率较高的发电机, 按照健康度的情况对发电机进行负荷转移, 优化潮流分布, 从发电机角度阻断连锁故障的发生;

## 4 算例分析

以 IEEE39 系统为算例, 对本文提出的方法进

行验证。系统包括 10 台发电机、39 条母线和 33 条线路, 发电机组参数见表 1。

表 1 发电机组参数

Table 1 Parameters of generators

发电机节点编号	机组健康度	调度成本/ (美元/MW)	出力(上限/ 下限)/MW
G1	0.83	1.2	350/100
G2	0.30	2	650/200
G3	0.82	1.8	800/300
G4	0.81	3.6	750/300
G5	0.80	3.2	650/250
G6	0.85	2.4	750/300
G7	0.83	1.4	750/250
G8	0.84	2	700/250
G9	0.82	2.4	900/400
G10	0.84	2.4	1 200/600

在正常负载水平下将本文提出的方法与普通控制方案仿真结果进行比较。其中, 预防控制方案采取调度发电机出力方式; 所有方案均采用基于负荷重要度的切机切负荷方式。在仿真过程中, 设定机组故障的维修成本相等,  $G^{\text{cost}}$  取 0.48 万美元<sup>[22]</sup>; 单位失负荷成本  $m^{\text{cost}}$  与调节单位功率成本  $k$  的设置参考文献<sup>[23]</sup>。

#### 4.1 健康度阈值及机组出力调整量求解

选取了 NSGA-II 算法求取燃煤机组连锁故障预防控制模型的 Pareto 解集, 其具有运行速度快、解集收敛性好的优点, 算法参数见表 2。

表 2 NSGA-II 算法设置参数

Table 2 Parameters of NSGA-II algorithm

设置参数	数值
种群规模	50
迭代次数	100
交叉概率	0.7
变异概率	0.4
交叉指数	36
变异指数	20

由 NSGA-II 算法计算优化模型下机组健康度阈值的 Pareto 解集, 得到系统风险和调度成本的 Pareto 前沿。如图 2 所示。

由于解集是由一组具有多目标的非劣解构成, 需从中选取最优解作为合适的健康度阈值  $H_0$ 。熵权法适用于处理该多目标决策问题, 能反映评价指标在不同评价方案中的差异, 并可计算出客观的指标权重<sup>[24]</sup>。

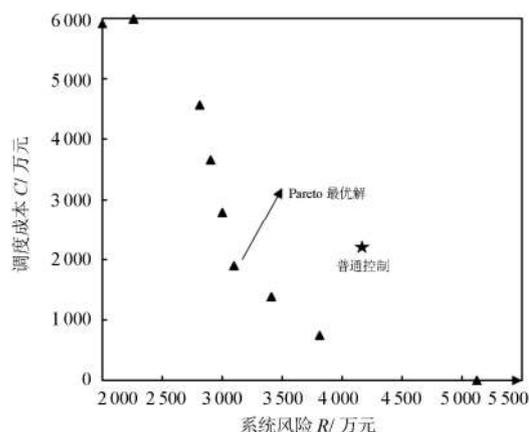


图 2 预防和阻断防控策略 Pareto 前沿

Fig. 2 Prevent and block the prevention and control strategy Pareto frontier

具体流程如图 3 所示, 通过计算可得本系统中的健康度阈值为 0.365, 各机组出力调整量如表 3 所示。

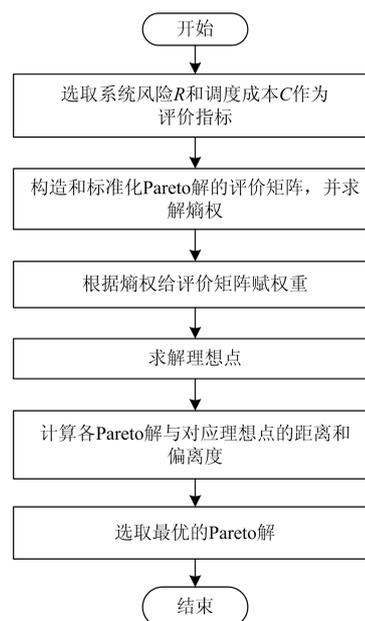


图 3 多目标熵权决策方法流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-objective entropy weight decision-making method

#### 4.2 系统关键线路识别及发电机功率调整

使用文献<sup>[25]</sup>中的方法找出可能导致电力系统大停电的关键线路, 识别结果如表 4 所示。

当线路 16-17 发生故障时, 由于 16-17 是关键线路, 可能会造成后续线路的连续过载, 因此需立即降低与其相连的另一条关键线路 15-16 的负载率, 发电机的出力调整策略如表 5 所示。

表 3 机组出力调整量

Table 3 Generator output adjustment

发电机节点编号	机组健康度	功率调整量/MW
G1	0.83	16.21
G2	0.30	-90.18
G3	0.82	31.12
G4	0.81	0
G5	0.80	16.56
G6	0.85	26.29
G7	0.83	0
G8	0.84	0
G9	0.82	0
G10	0.84	0

表 4 IEEE39 节点的线路电气介数

Table 4 Electrical betweenness of the line in IEEE39

线路	电气介数	排序
16-17	28 258	1
16-19	20 427	2
13-14	19 667	3

表 5 发电机出力调整策略

Table 5 Generator output adjustment strategy

编号	发电机	加/减出力	功率调整量/MW
1	33	减	81.47
2	34	减	15.76
3	36	减	65.57
4	32	加	70.60
5	38	加	43.87

对关键线路的负载及时进行调整可有效降低系统发生连锁故障的概率,对系统的安全稳定具有重要意义。

### 4.3 不同控制策略比较

从 Pareto 解集中选取四组方案(包含最优方案 1),可以得到如下结论,如表 6 所示。

表 6 不同控制方案的风险和控制代价比较

Table 6 Comparison of system risk and control costs of different control measures

方案	普通控制		结合预防控制和阻断控制的防控策略	
	系统风险 R/美元	调度成本 C/美元	系统风险 R/美元	调度成本 C/美元
1	4 240	2 480	2 899	2 688
2			2 901	3 654
3			3 100	1 899
4			3 411	1 388

由图 3 与表 6 可知:

1) 结合预防和阻断的防控策略中,对于 Pareto 解集中不同的健康度阈值,当系统风险  $R$  降低时,会相应地牺牲其经济性,调度成本  $C$  有所上升。

2) 普通控制的系统风险  $R$  与调度成本  $C$  为与机组健康度阈值无关的函数,所以对于 Pareto 的 4 组不同的解,  $R$  和  $C$  的值保持不变。

3) 对于 Pareto 解集中随机选取的四组解(包含最优方案 1),在系统风险  $R$  上得到了很大的提升,而同时最优解的调度成本  $C$  也显示出了预防和阻断防控策略相对于普通控制的优越性,能有效地减小系统风险,并提高系统控制的经济性。

## 5 结论

本文主要针对系统中关键的发电环节,从提高燃煤机组供载安全性和经济性的角度出发,提出衡量燃煤机组健康状态的机组健康度指标,再基于该指标构建协调系统风险和调度成本的多目标优化模型,并采用 NSGA-II 算法和熵权决策法求解优化健康度阈值。同时,从发电机负荷转移角度设计结合预防控制与阻断控制两种方式的改进连锁故障控制策略,确保故障机组负荷能及时按健康度排序分配到其他机组。算例分析表明,改进的连锁故障联合控制策略在系统风险及经济性的综合指标上优于普通控制方案。本文未来工作在兼顾系统安全性与经济性的基础上,结合系统甩负荷和自恢复等其他因素,进一步研究结合预防控制与阻断控制的连锁故障防控策略。

## 参考文献

[1] 曾鸣,杨雍琦,李源非,等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.  
ZENG Ming, YANG Yongyi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.

[2] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.  
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-Grid-Load-Storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J].

- Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [3] SUN Qiming, SHI Libao, NI Yixin, et al. An enhanced cascading failure model integrating data mining technique[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 19-28. DOI: 10.1186/s41601-017-0035-3.
- [4] 田继伟, 王布宏, 李夏. 智能电网状态维持拓扑攻击及其对经济运行的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 50-56.
- TIAN Jiwei, WANG Buhong, LI Xia. State-preserving topology attacks and its impact on economic operation of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 50-56.
- [5] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
- XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 2-8.
- [6] DEY P, MEHRA R, KAZI F, et al. Impact of topology on the propagation of cascading failure in power grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(4): 1970-1978.
- [7] CAI Ye, CAO Yijia, LI Yong, et al. Cascading failure analysis considering interaction between power grids and communication networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 530-538.
- [8] WANG Feng, LI Lijuan, LI Canbing, et al. Fractal characteristics analysis of blackouts in interconnected power grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1085-1086.
- [9] RICHTER M, MOLLENBRUCK F, OBERMULLER F, et al. Flexibilization of steam power plants as partners for renewable energy systems[C] // 2016 Power System Computation Conference (PSCC), June 20-24, 2016, Genoa, Italy: 1-8.
- [10] ZHOU Kaile, YANG Shanlin, SHEN Chao, et al. Energy conservation and emission reduction of China's electric power industry[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 10-19.
- [11] 程林, 刘满君, 何剑, 等. 基于马尔可夫过程的电力系统连锁故障解析模型及概率计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 130-136.
- CHENG Lin, LIU Manjun, HE Jian, et al. A power system cascading outage analytic model and outage probability calculation method based on Markov process[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 130-136.
- [12] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.
- CHEN Xiaogang, SUN Ke, CAO Yijia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.
- [13] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1-9.
- SUN Ke, HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Review on models of cascading failure in complex power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 1-9.
- [14] 曹一家, 陈彦如, 曹丽华, 等. 复杂系统理论在电力系统中的应用研究展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 1-9.
- CAO Yijia, CHEN Yanru, CAO Lihua, et al. Prospects of studies on application of complex system theory in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 1-9.
- [15] 刘文颖, 王佳明, 谢昶, 等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 142-149.
- LIU Wenyong, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 142-149.
- [16] 张家美, 黎灿兵, 彭敏放, 等. 基于综合功率介数的主动配电网脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 41-48.
- ZHANG Jiamei, LI Canbing, PENG Minfang, et al. Vulnerable links analysis based on integrated active power betweenness in active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 41-48.
- [17] 黄翌, 汪飒, 谭阳红, 等. 基于健康度和重要度的配电网运行风险评估方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 136-141.
- HUANG Zhao, WANG Feng, TAN Yanhong, et al. Operational risk assessment based on health and

- importance indexes for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 136-141.
- [18] 常太华, 田亮, 苏杰, 等. 电力系统设备运行状态在线评估系统设计[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2005, 32(4): 44-47.  
CHANG Taihua, TIAN Liang, SU Jie, et al. Design of online evaluation system of running state for electric power system equipment[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2005, 32(4): 44-47.
- [19] 符向前, 刘光前, 蒋劲, 等. 基于信息熵的机组运行劣化度综合指标[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 75-78.  
FU Xiangqian, LIU Guanglin, JIANG Jin, et al. An evaluation index of the hydroelectric generating sets overall performance based on information entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 75-78.
- [20] 马海英, 周林, 王亮. 基于劣化度的装备健康状态评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(10): 66-69.  
MA Haiying, ZHOU Lin, WANG Liang. Research on the model of equipment health state evaluation based on deterioration degree[J]. Fire Control and Command Control, 2014, 39(10): 66-69.
- [21] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明, 等. 电力系统运行风险评估中元件时变停运模型分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 7-12.  
NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Analysis of a time-varying power component outage model for operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 7-12.
- [22] 曹钟中, 杨昆, 顾煜炯, 等. 电站给水泵组 RCM 定量分6+析方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 207-211.  
CAO Zhongzhong, YANG Kun, GU Yujiong, et al. Quantitative RCM analyzing method for feed pump units in power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 207-211.
- [23] 丁明, 钱宇骋, 张晶晶, 等. 基于风险评估的电力系统连锁故障协调控制模型[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 1-8.  
DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing, et al. Coordinated control model of power system cascading failures based on risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 1-8.
- [24] ZOU Zhihong, YUN Yi, SUN Jinnan. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 10-20.
- [25] 王仁伟, 张友刚, 杨阳, 等. 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 1-6.  
WANG Renwei, ZHANG Yougang, YANG Yang, et al. Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 1-6.

收稿日期: 2018-08-05; 修回日期: 2019-03-11

作者简介:

林玥廷(1983—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统调度自动化工作; E-mail: sandralam@163.com

张维奇(1977—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电力调度运行工作及电力系统电压分析和控制方面的研究;

林英明(1975—), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事大电网调度及电力技术管理研究工作。E-mail: 4604121@qq.com

(编辑 魏小丽)