

计及输电元件实时运行态势的电网运行风险决策

李明¹, 郭志红¹, 韩学山², 逯遥³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250001; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;
3. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250002)

摘要: 在电网优化调度与控制决策过程中, 其运行的经济性与可靠性往往存在着不一致。为统筹二者之间的关系, 构建了计及输电元件实时运行态势的电网运行风险决策模型。该模型从风险的角度, 以电网期望运行净收益最大化为目标, 以机组出力、电网节点失负荷量为决策量, 在满足所有预想事故发生前后状态对应约束集下实现模型求解。该模型将电网运行风险评估理论与电网运行决策进行融合, 丰富和发展了电网运行风险决策理论。通过算例分析验证, 论证了所提模型的合理性和有效性。

关键词: 电网; 输电元件; 运行风险; 停运概率; 风险决策

Power grid risk-based decision-making considering real-time operation situation of transmission component

LI Ming¹, GUO Zhi-hong¹, HAN Xue-shan², LU Yao³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250001, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250002, China)

Abstract: There is inconsistency between the economy and reliability of power grid operation during power grid optimal dispatch and control decision-making. In order to co-ordinate the inconsistency, a risk decision model is constructed taking into account the real-time power grid operation. The model is based on the concept of risk. The goal is expectation maximization for load revenue. The amounts of decision making are the generating capacity and load cut. The constraints include state constraints before and after the incident or coupling between these incidents. The model combines power grid risk assessment theory with power grid decision theory, enriches and develops the power grid risk decision-making theory. Finally, a numeral case is proposed to prove the validity and feasibility of the model.

This work is supported by National Nature Science Foundation of China (No. 51077087 and No. 51007047).

Key words: power grid; transmission component; operation risk; outage probability; risk-based decision-making

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0088-06

0 引言

伴随着发、输、配、用电逐渐分离, 不同利益实体以自身收益的最大化为目标, 势必会增加电网运行的压力^[1], 使电网运行水平趋于安全域的边界, 如何协调电网运行的安全、经济问题, 成为人们关注的焦点^[2-3]。同时, 电网中老化设备不断增加, 设备的随机停运故障次数增多, 并且在日益扩大的互联电网中, 影响范围更广、程度更强^[4-6]。这就要求在电网优化调度与控制决策过程中, 必须考虑不确定因素, 从经济性与可靠性的综合角度出发, 进行

统筹决策^[7]。

当前, 在时间级别、指标表达、应用场景上, 传统电网可靠性评估理论^[8-11]难以直接应用于满足上述背景的电网优化调度与控制决策。1997年, 国际大电网会议(CIGRE)首次提出电网运行风险评估概念^[12], 受到国内外学者高度重视, 随之开展大量的研究, 这些研究大体上可分为两个阶段。第一个阶段, 对其概念、指标与方法等核心问题进行研究, 如文献[13]对电网运行风险评估的初步探索, 指出运行风险评估和传统风险评估的理论在数学模型上其本质是一致的, 区别在于应用场景不同, 提出将电网运行风险评估架构在EMS/DTS平台上, 并从状态选择、状态分析及指标定义等的角度对其

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077087, 51007047)

算法进行设计; 文献[14]指出电网设备发生故障的可能性是随外部天气条件、老化程度等运行工况变化而变化的, 在运行风险评估中需要采用时变的设备停运模型; 文献[15]给出一种计及设备运行状态时变性和自动装置调节作用的运行风险概率评估算法, 有效提高了运行风险评估的可信度; 文献[16]根据电网运行风险评估的目标特点, 即辅助运行人员进行调度决策, 提出运行可靠性成本价值评估的概念和指标, 指出期望社会成本作为运行人员选择最优调度方案的决策依据。该阶段研究是对某一运行状态下的电网进行静态的风险评估, 风险评估与运行决策是分离的。第二个阶段, 电网运行风险评估与决策之间进行融合, 从风险评估发展到风险决策的理念。如文献[17]在传统安全约束优化调度中考虑了随机事件的发生概率, 将后果代价与调度决策进行协调, 与运行风险评估的研究在理念上是不同的; 文献[18]在对电网的运行状态概率进行连续预测的基础上, 与有功调度决策进行结合, 以概率期望的方式, 将可信预想状态进行牵制, 实现风险与收益间的协调; 文献[19]则进一步考虑电网的安全性, 构建电网安全与经济相协调的概率调度模型。

上述研究中, 电网运行的不确定性缺乏对其实时运行态势(输电元件载荷、母线电压水平、电力系统频率等)的考虑, 而文献[20]对该问题有所涉及, 并通过一个简单电力系统算例分析, 验证实时运行条件对电力系统运行风险有着显著影响。

在此基础上, 本文重点研究输电元件故障特性与其载荷之间的关系, 基于风险的理念, 以系统的总收益最大为目标, 构建了计及输电元件运行态势的电网运行风险决策模型, 并给出相应的求解方法, 通过算例验证分析了本文研究的意义。

1 输电元件载荷对其停运概率的影响分析

随着输电元件载荷的增大, 其停运概率增大, 表现为两个方面: ①随着输电元件载荷增加, 发热量增加, 如果输电元件长时间处于高温下, 设备的机械强度会降低; 同时导体在高温时会膨胀, 增加输电线路的弧垂, 面临安全净距裕度减少; ②当输电元件载荷大于热稳定极限时, 输电元件的过负荷、过电流保护装置会动作, 其动作时限与载荷大小有关, 如反时限过负荷继电器, 即载荷越大, 保护动作时间的整定值越小, 采取控制措施成功使输电元件载荷降低到正常值范围的可能性减小, 输电元件跳闸退出运行的概率就越大。

已往可靠性数据统计过程中, 在统计输电元件停运概率时, 缺乏对设备载荷因素的考虑, 无法获

得停运概率与载荷间的关系。本文在文献[16]的思想启发下, 基于直流潮流进行建模(这里输电元件载荷仅考虑有功功率), 考虑输电元件载荷具有方向性的特点, 给出输电元件停运概率与其载荷间关系的曲线, 如图1表示, 其中 Pr_{\max} 、 Pr_{\min} 为输电元件的最大、最小的停运概率, L_{normal}^{\max} 、 $L_{\text{ab-normal}}^{\max}$ 为输电元件正常状态、异常状态对应载荷的最大值。

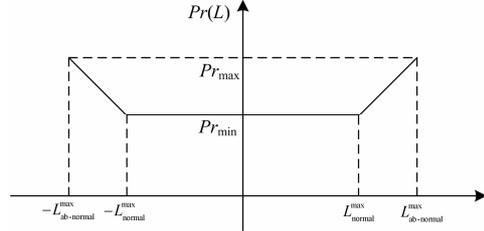


图1 输电元件停运概率与其载荷之间的关系

Fig. 1 Relationship between the outage probability of transmission components and its load

2 风险决策模型

2.1 费用函数

发电机组成本函数为

$$C_{G_i}(P_{G_i}) = a_i \cdot P_{G_i} \quad (1)$$

式中: a_i 为机组 i 的单位发电量对应的成本系数; P_{G_i} 为机组 i 输出的有功功率, 这里假设发电机成本特性是线性的, 亦可用分段线性来描述发电机组成本的非线性特性。

负荷收益函数为

$$B_{L_i}(P_{L_i}) = e_i \cdot P_{L_i} \quad (2)$$

式中, e_i 为节点负荷 i 的单位有功功率的收益。

机组再调度所引起的费用函数为

$$CR_i(P_{G_i}^0, P_{G_i}^k) = a_{\Delta i} |P_{G_i}^k - P_{G_i}^0| \quad (3)$$

式中, $a_{\Delta i}$ 为机组调整单位功率需要的费用代价。

意外中断负荷赔付费用为

$$CI_i(r_{L_i}) = \alpha_{L_i} \cdot r_{L_i} \quad (4)$$

式中, α_{L_i} 为节点负荷 i 意外中断单位负荷需要赔付的费用代价。

2.2 几个问题的处理说明

2.2.1 输电元件停运概率与其载荷间关系的表达

为了处理图1所示的分段函数, 引入三个变量, 如式(5)中所示, 输电元件载荷 L 可以表示成变量 L_1 、 L_2 、 L_3 的代数和。

$$\begin{cases} L = L_1 + L_2 + L_3 \\ -L_{\text{normal}}^{\max} \leq L_1 \leq L_{\text{normal}}^{\max} \\ -L_{\text{ab-normal}}^{\max} \leq L_2 < -L_{\text{normal}}^{\max} \\ L_{\text{normal}}^{\max} < L_3 \leq L_{\text{ab-normal}}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式(6)给出输电元件停运概率与变量 L_2 、 L_3 间的关系表达。

$$pr(L) = pr_{\min} + \frac{pr_{\max} - pr_{\min}}{L_{\text{ab-normal}}^{\max} - L_{\text{normal}}^{\max}} \cdot L_3 - \frac{pr_{\max} - pr_{\min}}{L_{\text{ab-normal}}^{\max} - L_{\text{normal}}^{\max}} \cdot L_2 \quad (6)$$

2.2.2 机组输出功率紧急再调整费用函数中绝对值的处理

如式(3)所示, 机组输出功率紧急再调整费用含有绝对值, 这里引入两个变量 ω_i^+ 、 ω_i^- , 如式(7)所示。

$$\begin{cases} \omega_i^+ \geq \max(0, P_{Gi}^k - P_{Gi}^0) \\ \omega_i^- \geq \max(0, P_{Gi}^0 - P_{Gi}^k) \end{cases} \quad (7)$$

由此, 对式(3)进行变形, 以消除绝对值表示形式, 如式(8)所示。

$$CR_i(P_{Gi}^0, P_{Gi}^k) = a_{\Delta i} (\omega_i^+ + \omega_i^-) \quad (8)$$

2.2.3 预想事件集选择

采用 $N-1$ 预想事件集, 其他情景发生概率极小, 主要基于以下两点原因:

- (1) 随着状态检修技术的推广, 运行管理人员能够及时对输电元件的性能进行评价;
- (2) 由于本研究是运行场景下的风险决策, 研究的时间尺度相对较短。

因此, 选择单重输电元件停运, 既符合实际, 又有利于问题求解。

2.3 电网运行风险决策模型

本文从运行风险角度出发, 以电网运行收益最大化为目标, 约束条件包括预想事件发生前后运行状态约束及它们间的耦合约束。其中, 收益为收入减去各种成本, 收入是指负荷收益, 成本包括机组发电成本、事故后机组再调度引起的费用及意外中断负荷的赔付费用等。

2.3.1 目标函数

$$\text{Max} \left\{ pr^0(\mathbf{L})S^0 + \sum_{k=1}^{N_k} pr^k(\mathbf{L})S^k \right\} \quad (9)$$

$$S^0 = \sum_{i \in PL} B_{Li}(P_{Li}^0) - \sum_{i \in PG} C_{Gi}(P_{Gi}^0) - \sum_{i \in PL} CI_i(r_{Li}^0) \quad (10)$$

$$S^k = \sum_{i \in PL} B_{Li}(P_{Li}^k) - \sum_{i \in PG} C_{Gi}(P_{Gi}^k) - \sum_{i \in PL} CR_i(P_{Gi}^0, P_{Gi}^k) - \sum_{i \in PL} CI_i(r_{Li}^k) \quad (11)$$

$$pr^0(\mathbf{L}) = 1 - \sum_{k=1}^{N_k} pr^k(\mathbf{L}) \quad (12)$$

式(9)~式(12)中: \mathbf{L} 为各输电元件传输的有功功率向量; $pr^0(\mathbf{L})$ 、 $pr^k(\mathbf{L})$ 为电网处于无预想事件发生状态、事故 k 发生状态的概率, 二者间的关系

如式(12)所示; S^0 、 S^k 分别为电网处于无预想事件发生状态、事故 k 发生状态时对应的收益; \mathbf{PL} 为电网负荷节点有功负荷功率向量; \mathbf{PG} 为电网机组输出有功功率对应节点的向量。

2.3.2 约束条件

预想事件发生前和第 k 个预想事件发生后的电力系统运行状态所应满足的约束为

$$\sum_{i \in PG} P_{Gi}^k + \sum_{i \in PL} r_{Li}^k = \sum_{i \in PL} P_{Li} \quad (13)$$

$$L_1 + L_2 + L_3 = A(k)(\mathbf{P}_G^k - \mathbf{P}_L + \mathbf{r}_L^k) \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_G^{\min} \leq \mathbf{P}_G^k \leq \mathbf{P}_G^{\max} \quad (15)$$

$$-L_{\text{normal}}^{\max} \leq L_1 \leq L_{\text{normal}}^{\max} \quad (16)$$

$$-L_{\text{ab-normal}}^{\max} \leq L_2 < -L_{\text{normal}}^{\max} \quad (17)$$

$$L_{\text{normal}}^{\max} < L_3 \leq L_{\text{ab-normal}}^{\max} \quad (18)$$

式(13)~式(18)中: $k=0, 1, 2, \dots, N_k$; $\mathbf{L}(k)$ 为输电元件有功功率传输向量; $\mathbf{A}(k)$ 为输电元件有功传输功率与节点注入有功功率间的关联矩阵; \mathbf{P}_G^k 为机组有功输出功率向量; \mathbf{r}_L^k 为节点负荷的失负荷向量; \mathbf{P}_G^{\max} 、 \mathbf{P}_G^{\min} 为发电机组有功输出功率的上下限值向量; \mathbf{L}^{\max} 为输电元件有功功率传输的允许限值向量。

预想事件发生前与第 k 个输电元件发生停运状态间的牵制约束集为

$$\mathbf{P}_G^k \geq \max(\mathbf{P}_G^{\min}, \mathbf{P}_G^0 - \mathbf{r}_D \Delta T) \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_G^k \leq \min(\mathbf{P}_G^{\max}, \mathbf{P}_G^0 + \mathbf{r}_U \Delta T) \quad (20)$$

$$0 \leq \mathbf{r}_L^k \leq \mathbf{P}_L \quad (21)$$

式(19)~式(21)中: \mathbf{r}_U 、 \mathbf{r}_D 分别为发电机组有功输出功率的上下允许调整速率向量; ΔT 为电网在事故状态下所允许的紧急再调整时间。

2.4 模型的求解

上述模型中, P_{Li}^0 、 P_{Li}^k 与 P_{Li} 之间的关系如式(22)所示。

$$\begin{cases} P_{Li}^0 + r_{Li}^0 = P_{Li} \\ P_{Li}^k + r_{Li}^k = P_{Li} \end{cases} \quad (22)$$

将目标函数展开, 如式(23)所示。

$$\text{Max} \left\{ pr^0(\mathbf{L})S^0 + \sum_{k=1}^{N_k} pr^k(\mathbf{L})S^k \right\} = \left\{ \sum_{i \in PL} e_i P_{Li} - \left(1 - \sum_{k=1}^{N_k} pr^k \right) \left(\sum_{i \in PG} a_i P_{Gi}^0 + \sum_{i \in PL} (\alpha_{Li} + e_i) r_{Li}^0 \right) + \sum_{k=1}^{N_k} pr^k \left(\sum_{i \in PG} a_i P_{Gi}^k + \sum_{i \in PG} a_{\Delta i} (\omega_i^+ + \omega_i^-) + \sum_{i \in PL} (\alpha_{Li} + e_i) r_{Li}^k \right) \right\} =$$

$$\text{Min} \left\{ \left(1 - \sum_{k=1}^{N_c} p^k \right) \left(\sum_{i \in PG} a_i P_{Gi}^0 + \sum_{i \in PL} (\alpha_{Li} + e_i) r_{Li}^0 \right) + \sum_{k=1}^{N_c} p^k \left(\sum_{i \in PG} a_i P_{Gi}^k + \sum_{i \in PL} (\alpha_{Li} + e_i) r_{Li}^k \right) \right\} + c \quad (23)$$

式(23)中, 由于 $c = \sum_{i \in PL} e_i P_{Li}$ 为常数, 该模型可以抽象表达为如下形式。

目标函数为

$$\text{Min}_{X^0, X^k, pr^k(L)} \left(1 - \sum_{k=1}^{N_c} pr^k(L) \right) \cdot F^0(X^0) + \sum_{k=1}^{N_c} pr^k(L) F^k(X^0, X^k) \quad (24)$$

s.t.

$$h^k(X^k) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, N_c$$

$$f^k(X^k) \leq 0, \quad k = 0, 1, \dots, N_c$$

$$g^k(X^k, X^0) \leq 0, \quad k = 0, 1, \dots, N_c$$

式中: X^0 、 X^k 分别表示电网预想事故前后的变量集合; $pr^k(L)$ 为事故 k 的发生概率, 受到输电元件载荷 L 的影响, 这里的 L 为预想事件发生前电网输电元件载荷向量; $h(X)$ 、 $f(X)$ 分别对应预想事件发生前及预想事件集中各事件状态对应的等式与不等式约束; $g^k(X^k, X^0)$ 为电网无预想事件状态与各预想事件间的关联约束。

可见式(24)是一个二次规划的数学模型, 可利用二次规划进行求解^[21]。

3 算例及其分析

3.1 算例基本数据

本文利用 Matlab 程序对上述模型进行求解。以 3 节点电网系统为例, 对电网风险决策模型进行了机理分析。图 2 给出 3 节点电网结构图, 表 1~表 3 分别给出发电机组、负荷、输电元件相关参数, 设预想事件发生后紧急容许的再调度时间为 $\Delta T = 5 \text{ min}$, 为更明显地进行机理分析, 从表 3 中可见, 仅输电元件 1~3 的停运概率与其载荷相关联, 其余输电元件的停运概率与其载荷无关。

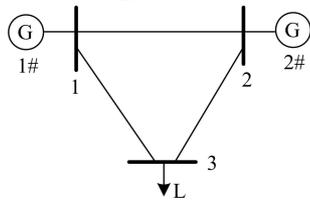


图 2 3 节点电网结构图

Fig. 2 Topology of 3-bus system

表 1 发电机组相关特性参数

Table 1 Unit characteristic data

机组	$(r_u / r_d) /$ (MW/min)	$a_i /$ (\$/MW)	$a_{\Delta i} /$ (\$/MW)	$P_{\min} /$ MW	$P_{\max} /$ MW
G1	10	10	0.5	10	70
G2	7	20	0.6	10	70

表 2 负荷节点相关数据

Table 2 Load bus characteristic data

参数	$\alpha_{Li} /$ (\$/MWh)	$e_i /$ (\$/MWh)	$P_{Li} /$ MW
L	100	60	61

表 3 输电元件相关数据

Table 3 Transmission device characteristic data

支路	X (标么值)	pr_{\min}	pr_{\max}	$L_{\text{normal}}^{\max} /$ MW	$L_{\text{ab-normal}}^{\max} /$ MW
1-2	0.2	0.001	0.001	18	20
1-3	0.1	0.001	0.038	36	40
2-3	0.1	0.001	0.001	36	40

3.2 算例分析

3.2.1 结果对比

为验证本文模型的有效性及其意义, 这里给出三种情况的结果, 情况 1、情况 2 不计及输电元件载荷对其停运概率的影响, 停运概率分别取其最小值、最大值, 情况 3 对应本文模型, 结果对比可见表 4。

表 4 结果对比分析

Table 4 Analysis of the result

情况	$P_{G1} /$ MW	$P_{G2} /$ MW	pr_{1-3}	总费用/ \$
情况 1	49.5	11.5	0.001 0	789.09
情况 2	49.5	11.5	0.038 0	911.09
情况 3	43.50	17.50	0.009 2	908.41

从表 4 可见, 情况 1 中输电元件 1~3 的停运概率相对于其实际停运概率较小, 决策结果过于乐观, 该情况总费用小于情况 3 得出的总费用; 情况 2 中, 输电元件 1~3 的停运概率相对其实际停运概率较大, 决策结果过于悲观, 该情况总费用大于情况 3 得出的总费用。因而, 电网风险决策过程中, 考虑输电元件载荷对其停运概率的作用, 可以避免已有风险决策模型中容易出现的乐观或悲观的情况。

3.2.2 影响因素分析

本文给出的电网风险决策模型受到多方面因素的影响, 如机组、负荷相关数据, 这里重点分析输电元件停运概率与其载荷之间关系的影响。

(1) 输电元件 1~3 停运概率的 pr_{\max} 影响规律分析

pr_{max} 从大到小, 给出了 10 种情况, 具体结果如表 5 所示。

表 5 输电元件停运概率的最大值的影响作用
Table 5 Impact of the maximum transmission outage probability

情况	P_{G1}/MW	P_{G2}/MW	pr_{max}	总费用/\$
情况 1	49.5	11.5	0.001	789.09
情况 2	49.5	11.5	0.01	818.76
情况 3	49.5	11.5	0.02	851.74
情况 4	49.5	11.5	0.03	884.71
情况 5	49.24	11.76	0.036	904.49
情况 6	46.29	14.71	0.037	907.05
情况 7	43.50	17.50	0.038	908.41
情况 8	41.5	19.5	0.039	908.71
情况 9	41.5	19.5	0.04	908.71
情况 10	41.5	19.5	0.05	908.71

表 5 中可见, 随着输电元件 1~3 的停运概率的 pr_{max} 的变化, 电网风险决策结果的变化大体上可分为 3 个区间。区间 1 中 pr_{max} 大体上在区间 (0.001, 0.036) 中, 该区间各发电机出力不变, 但总费用在不断增加, 可见该区间中输电元件 1~3 的停运概率的最大值相对较小, 元件状态较好, 在该区间中的主要矛盾为机组发电的经济性; 区间 2 中 pr_{max} 大体上在区间 (0.036, 0.039) 中, 该区间机组出力是变化的, 总费用在不断增加, 可见该区间中机组的经济性与输电元件的状态是两个主要的矛盾; 区间 3 中 pr_{max} 大体上在区间 (0.039, 1) 中, 该区间中机组出力不变、总费用也保持不变, 可见该区间输电元件的状态成为主要矛盾, 输电元件的载荷被限制在正常限值 L_{normal}^{max} , 避免输电元件 1~3 重载增大其停运概率。

(2) 输电元件 1~3 正常限值 L_{normal}^{max} 的影响作用分析

设输电元件 1~3 正常限值从 36 MW 降低到 34 MW, 重复表 5 分析过程, 具体结果见表 6。

表 6 输电元件正常限值的影响作用
Table 6 Impact of the transmission normal limits

情况	P_{G1}/MW	P_{G2}/MW	pr_{max}	总费用/\$
情况 1	49.5	11.5	0.001	789.09
情况 2	49.5	11.5	0.02	851.74
情况 3	49.5	11.5	0.04	917.69
情况 4	49.5	11.5	0.05	950.66
情况 5	49.5	11.5	0.052	957.25
情况 6	46.24	14.76	0.054	963.09
情况 7	42.42	18.58	0.056	966.74
情况 8	38.85	22.15	0.058	968.40
情况 9	37.5	23.5	0.06	968.53
情况 10	37.5	23.5	0.08	968.53

表 6 中可见, 输电元件 1~3 正常限值变化后, 电网风险决策结果的变化趋势同表 5 中结果类似, 只是该输电元件的 pr_{max} 区间的划分有所不同, 同理, 机组、负荷等相关特性对区间的划分同样具有影响。

可见, 电网风险决策结果受到输电元件停运概率与其载荷之间关系的影响, 而且这种影响是分区间的; 区间的划分范围受到多方面因素影响, 这种影响难以显式表达, 因而进行电网风险决策不仅是有意义的, 而且是有必要的。

4 结论

本文所提出的电网风险决策模型, 在运行层面上, 将输电元件的状态与其载荷进行关联, 有效地将电网运行的安全性、经济性与可靠性进行融合。具体结论如下:

(1) 输电元件的状态与其载荷相关联, 避免了电网运行决策过程中容易出现的过于“乐观”或“悲观”的决策结果, 有效地协调了电网运行的经济性、安全性与可靠性。

(2) 将电网运行风险评估理论与电网运行决策进行融合, 丰富和发展了电网运行风险决策理论。

(3) 有利于输电元件个体的使用, 从电网运行的角度去把握输电元件状态与其载荷之间的关系, 将为实现电网调度中检修与运行协调决策的理论的研究提供基础。

参考文献

- [1] 张少敏, 栗军, 王保义. 竞争电力市场下的电网公司经营风险综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 70-74.
ZHANG Shao-min, LI Jun, WANG Bao-yi. Comprehensive evaluation model of grid corporation business risk under the competitive electricity market[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 70-74.
- [2] 张强, 韩学山, 徐建政. 安全经济调度与均匀调度间关系分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 84-89.
ZHANG Qiang, HAN Xue-shan, XU Jian-zheng. Analysis of security economic dispatch and homogeneous dispatch[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(2): 84-89.
- [3] 商金成, 周劭英, 程满. 兼顾安全与经济的电力系统优化调度协调理论[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(6): 28-33.
SHANG Jin-cheng, ZHOU Jie-ying, CHENG Man. Coordination theory of electric power system optimal dispatch considering security and economics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(6): 28-33.

- [4] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化成为电力灾难—北美“8.14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.
- [5] US-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[R]. April 2004.
- [6] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25. DONG Xin-zhou, CAO Run-bin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [7] 付蓉, 蒋国平, 王保云. 计及系统连锁故障风险的电网预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 12-17. FU Rong, JIANG Guo-ping, WANG Bao-yun. A preventive control strategy for power grid considering system cascading failure risk[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 12-17.
- [8] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型、方法和应用[M]. 周家启, 卢继平, 胡小正, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 66-69.
- [9] 赵书强, 李聪. 快速配网风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 58-61. ZHAO Shu-qiang, LI Cong. Rapid risk assessment for the distributed grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 58-61.
- [10] 吴耀武, 娄素华, 余永泉, 等. 电力市场环境下载电线路过载风险评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 198-203. WU Yao-wu, LOU Su-hua, YU Yong-quan, et al. Overload risk assessment of power transmission line under power electrical market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 198-203.
- [11] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 电力系统短期可靠性评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 143-154. SUN Yu, WANG Xiu-li, WANG Jian-xue, et al. An overview of the short-term reliability evaluation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 143-154.
- [12] CIGRE Task Force 38.03.12. Power system security assessment, a position paper[J]. Electra, 1997(175): 49-77.
- [13] 冯永青, 吴文传, 孙宏斌, 等. 现代能量控制中心的运行风险评估研究初探[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 73-79. FENG Yong-qing, WU Wen-chuan, SUN Hong-bin, et al. A preliminary investigation on power system operation risk evaluation in the modern energy control center[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 73-79.
- [14] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 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 Liao-yi, WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Analysis of a time-varying power component outage model for operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 7-12.
- [15] 王成亮, 赵渊, 周家启, 等. 基于日发电计划的电力系统运行风险概率评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 6-10. WANG Cheng-liang, ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, et al. Probabilistic evaluation of power system operational risk based on daily generation scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 6-10.
- [16] 何剑, 程林, 孙元章. 电力系统运行可靠性成本价值评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 5-9. HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Power system operational reliability cost/worth evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 5-9.
- [17] Condren J, Gedra T W, Damrongkulkamjorn P. Optimal power flow with expected security assessment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 541-547.
- [18] 查浩, 韩学山, 杨朋朋. 电网运行状态下的概率优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 54-60. ZHA Hao, HAN Xue-shan, YANG Peng-peng. Probabilistic optimal dispatching under operating condition of power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 54-60.
- [19] 查浩, 韩学山, 王勇, 等. 电力系统安全经济协调的概率调度理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 16-22. ZHA Hao, HAN Xue-shan, WANG Yong, et al. Study of power system probabilistic dispatching with security-economy coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 16-22.
- [20] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 6-12. SUN Yuan-zhang, CHENG Lin, LIU Hai-tao. Power system operation reliability evaluation based on real-time operating state[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 6-12.
- [21] Goldfarb D, Liu S. An optimal interior point algorithm for convex quadratic programming[J]. Mathematical Programming, 1989, 44: 43-46.

收稿日期: 2013-05-09; 修回日期: 2013-10-12

作者简介:

李明(1982-), 男, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: lm_sdpj@163.com

郭志红(1959-), 女, 教授, 主要从事电力系统过电压、电磁环境、输变电检修等方面的研究工作;

韩学山(1959-), 男, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事电力系统优化调度领域的研究和教学工作。